

61:02-5/2513-9

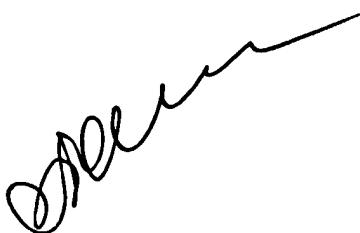
ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

На правах рукописи

ПАНОВ ЕВГЕНИЙ ИВАНОВИЧ

**СОЗДАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАНА
ПОПЕРЕЧНО – ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ**

05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением



Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Синицкий Владимир Михайлович

Москва 2002

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТАНОВ ПОПЕРЕЧНО–ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ	7
1.1. Общность технологических и конструкторских направлений по использованию поперечно-винтовой прокатки в нашей стране и за рубежом	7
1.2. Обоснование необходимости создания универсального стана поперечно-винтовой прокатки	21
ГЛАВА 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАНА ПОПЕРЕЧНО–ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ПВП 20-60	26
2.1. Описание конструкции рабочей клетки	26
2.2. Описание конструкции линии универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 (вариант промышленного назначения)	33
2.3. Краткое описание технологического процесса	42
2.3.1. Работа стана ПВП 20-60 в режиме прошивки	43
2.3.2. Работа стана ПВП 20-60 в режиме раскатки	45
2.3.3. Работа стана ПВП 20-60 при прокатке изделий периодического профиля	48
2.4. Реализация технического проекта в рабочий при изготовлении на ЭЗТМ универсального стана ПВП 20-60 в металле	52

ГЛАВА 3. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО	
СТАНА ПОПЕРЕЧНО–ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ПВП 20-60	79
3.1. Расширение технологических возможностей стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60	79
3.1.1. Прокатка круглых тел – шаров для мельниц и подшипников	80
3.1.2. Прокатка коротких тел вращения (штифты, втулки)	84
3.1.3. Прокатка профилированных труб для втулочных изделий типа велосипедных втулок	86
3.1.4. Прокатка изделий с винтовой (резьбовой) поверхностью	87
3.1.5. Прокатка ребристых труб	91
ГЛАВА 4. ТРЕХМЕРНОЕ КОНЕЧНО–ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО–ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ СПЛОШНОЙ ЗАГОТОВКИ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
	97
4.1. Общие соображения и допущения	97
4.2. Анализ распределения напряжений при двух- и трехвалковой схемах прокатки с задним подпором T_b усилием 120 кН	110
4.3. Анализ распределения напряжений при двух- и трехвалковой прокатке с натяжением усилием $T_f = 80$ кН	125
4.4. Анализ распределения и описание напряжений, возникающих при двух- и трехвалковой схемах прокатки с одновременным приложением усилий подпора $T_b = 120$ кН и натяжения $T_f = 80$ кН	145

	стр.
4.5. Некоторые соображения о возможностях дальнейшего применения метода трехмерного конечно-элементного моделирования процессов поперечно-винтовой прокатки и выводы по результатам исследования	169
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТАНЕ ПВП 20-60 ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ	
5.1. Краткое введение	182
5.2. Материал и методика проведения исследования	186
5.2.1. Используемые материалы	186
5.2.2. Технология непрерывного литья и модифицирования структуры слитков сплавов 01390 и 01391	187
5.2.3. Методика проведения поперечно-винтовой прокатки	189
5.2.4. Методика исследования структуры слитков и катаных прутков ..	190
5.3. Результаты исследования структуры катаных прутков	192
5.4. Выводы	200
6. Основные выводы по работе	201
7. Список литературы	204

Введение

Использование двухвалковой схемы поперечно-винтовой прокатки в России и за рубежом для прошивки заготовок в полуую гильзу для производства горячекатаных труб известно около 150 лет, и долгое время этот процесс оставался основным и практически неизменным. Его совершенствование всегда являлось важной задачей для исследователей и конструкторов в попытках повысить производительность процесса, снизить технологические, энергетические и, как следствие, – экономические затраты при производстве выпускаемой продукции.

В течение длительного периода времени считалось, что только способ поперечно-винтовой прокатки с двухвалковой схемой прошивки может применяться для изготовления гладких бесшовных труб, так как именно при двухвалковой схеме металл деформируется таким образом, что вследствие неравномерности степени деформации в осевой зоне заготовки возникают растягивающие напряжения, приводящие к нарушению сплошности металла и вскрытию внутренней полости заготовки, что в свою очередь снижает осевое давление на прошивную оправку. Длительное время предварительное вскрытие внутренней полости считалось положительным фактором при прошивке гильз и утверждение, что прошивка на станах поперечно-винтовой прокатки возможна лишь при наличии в заготовке полости перед оправкой, долгое время являлось доминирующим.

Однако при подобном взгляде на процесс прошивки производство качественных труб из высоколегированных сталей и сплавов был невозможен из-за образования плен и закатов на внутренней поверхности труб, которые (плены и закаты) являлись прямым результатом предварительного вскрытия внутренней полости в заготовке.

Первые предположения о возможном предотвращении предварительного вскрытия внутренней полости заготовки в случае применения трехвалковой схемы прошивки сделаны в работах [1-2], хотя упоминания о

попытках осуществить прокатку на первом опытном трехвалковом стане [3] относятся к 1883 г. Позднее, в 1926 году также делались безуспешные попытки осуществить прошивку на трехвалковом стане американской фирмы Блисс, И.У. В течение 1928-1932 гг. в США были продолжены исследования процесса прошивки на трехвалковом прошивном стане.

Исходя из представлений о возможности ведения процесса прошивки при наличии в заготовке полости перед оправкой, многие исследователи считали, что на трехвалковых станах отсутствуют условия, которые бы облегчали внедрение носка оправки в металл, поэтому процесс неосуществим или затруднен, и является весьма энергоемким.

Последующие исследования показали, что прошивка на станах поперечно-винтовой прокатки, в т.ч. и на двухвалковых, возможна и реально осуществима без предварительного вскрытия внутренней полости перед прошивной оправкой. При этом значительно улучшается качество внутренней поверхности гильз, возрастает стойкость оправок и снижается расход энергии [3].

Тем не менее, ряд исследователей считали, что склонность к разрушению металла при прокатке на трехвалковых станах имеет место, но она значительно меньше, чем на двухвалковом. Некоторые исследователи считали, что разрушение металла в осевой зоне при прошивке на трехвалковом стане происходит также, как и на двухвалковом, но при большей величине критического обжатия [6], другие ученые и исследователи в своих работах эти утверждения отрицали [7].

Дополнительно прилагаемые к заготовке осевые усилия подпора и натяжения как при двухвалковой, так и при трехвалковой схемах прокатки-прошивки позволяет в значительной степени влиять на изменение схемы напряженного состояния в очаге деформации. Этим предотвращается преждевременное вскрытие внутренней полости в осевой зоне заготовки и дает возможность выполнять поперечно-винтовую прокатку, особенно при трехвалковой схеме, с повышенными обжатиями [8].

Глава 1. Тенденции развития конструктивных особенностей станов поперечно-винтовой прокатки

1.1. Общность технологических и конструкторских направлений по использованию поперечно-винтовой прокатки в нашей стране и за рубежом

Многочисленные исследования процессов поперечно-винтовой прокатки, напряженно-деформированного состояния и преимуществ трехвалковой схемы поперечно-винтовой прокатки в 50-60 гг. явились толчком для создания различных конструкций станов поперечно-винтовой прокатки с трехвалковой схемой прокатки как в нашей стране, так и за рубежом.

Так, в Германии разработана конструкция трехвалкового прошивного стана [3], показанная на рис. 1 .

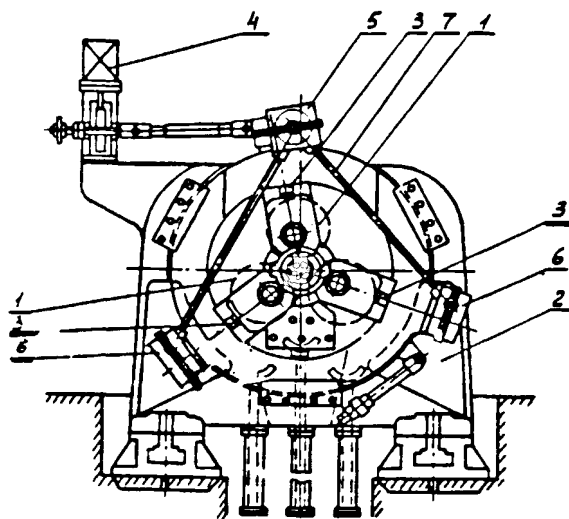


Рис. 1. Конструкция трехвалкового прошивного стана, разработанная в ФРГ.

Рабочие валки 1 расположены в круглом корпусе 2, нажимные винты 3 имеют общий привод от электродвигателя 4 через редукторы 5 и 6 и промежуточные валы 7. Наличие общего привода нажимных винтов обеспечивает одновременное разведение или сближение рабочих валков, что

дает возможность центрировать оси рабочих валков относительно оси прокатки.

В США создана конструкция трехвалкового прошивного стана (рис.2)

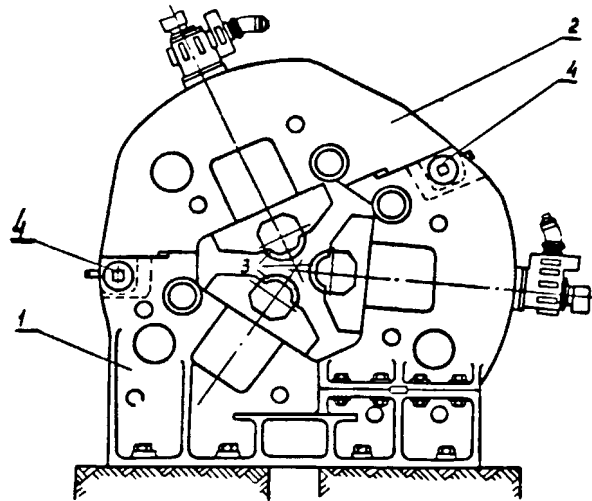


Рис. 2 Конструкция трехвалкового прошивного стана со съемной крышкой, разработанная в США.

Рабочая клеть трехвалкового прошивного стана включает станину, состоящую из основания 1 и крышки 2, в которые устанавливаются обоймы для размещения подушек с рабочими валками 3. Основание и крышка соединены между собой стопорными устройствами 4 [3].

На (рис. 3) показана конструкция рабочей клетки, разработанная в СССР [3], которая может быть использована в качестве прошивной. Клеть состоит из станины 1, крышки 2, соединенной со станиной осями 3 и 4 и клиньями 5, барабанов 6, в которые вставлены кассеты с валками 7, механизмов зажима и поворота барабанов 8 и механизмов перемещения рабочих валков 9. Крышка откидывается с помощью гидроцилиндра 10, установленного вне клетки, и опирается при откидывании на пружинный буфер 11, смонтированный на общей с гидроцилиндром стойке 12. После откидывания крышки валки извлекаются легко, чем сокращается время пере-валки [3].

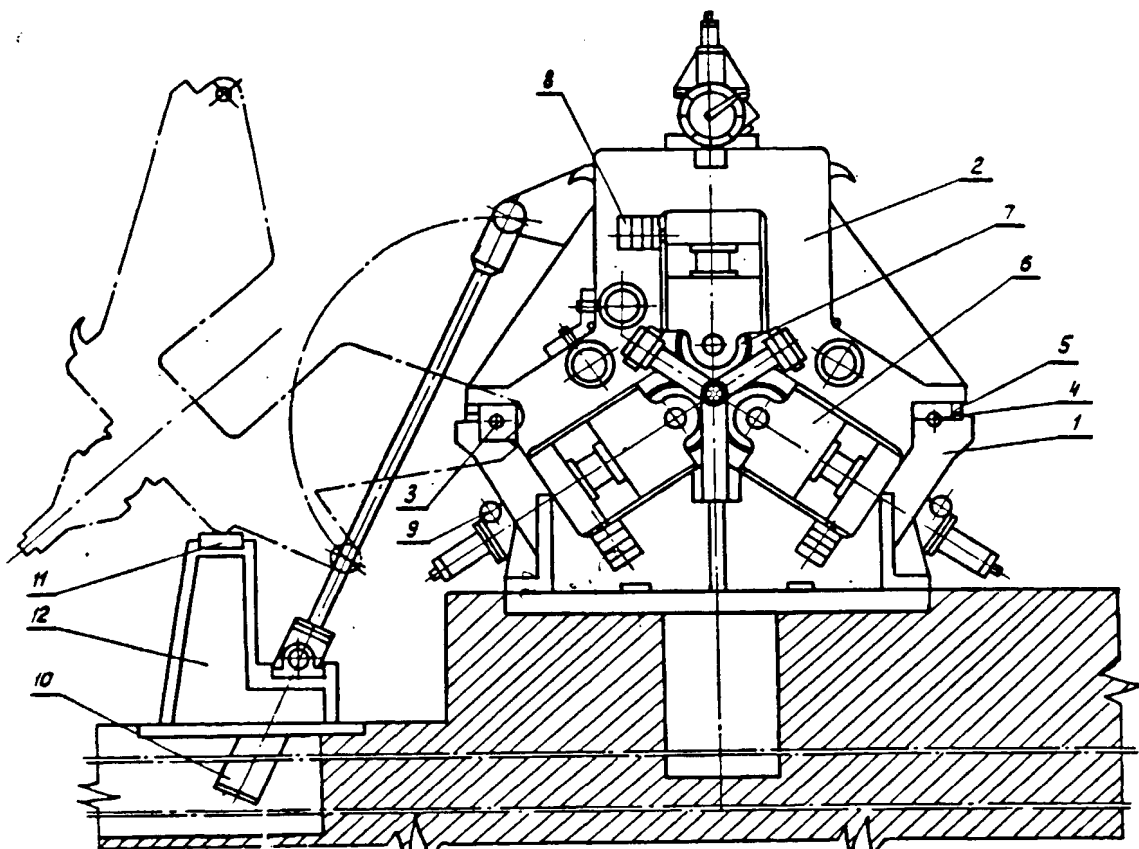


Рис. 3 Конструкция рабочей клетки трехвалкового прошивного стана с поворотной крышкой, разработанной в СССР.

1 – станина, 2 – крышка, 3 и 4 – соединительные оси, 5 – клинья крепежные, 6 – барабаны, 7 – кассеты с рабочими валками, 8 – механизм зажима и поворота барабанов, 9 – механизм перемещения рабочих валков, 10 – гидроцилиндр для откидывания крышки, 11 – буфер пружинный, 12 – стойка для фиксирования положения крышки.

ВНИИМЕТМАШем, под непосредственным руководством академика А.И.Целикова разработан ряд трехвалковых станов 10, 20, 50, 70, 80, 100, 120, 220, где обозначение в цифрах означает типоразмеры стана, под которым понимается наибольшим диаметр прокатываемой заготовки.

Указанные станы имеют различное предназначение, начиная от опытно-экспериментальных и исследовательских и опытно-промышленных до промышленного назначения. В связи с тем, что в различных отраслях ма-

шиностроения широко применяются сплошные и полые изделия круглого сечения с переменным по длине диаметром (вагонные и тракторные оси, ступенчатые и конические валы, полуоси для автомобилей, торсионные валы, шпиндели для текстильных веретен и др.) в это же время создаются трехвалковые станы поперечно-винтовой прокатки для производства изделий периодического сечения как по наружному, так и внутреннему диаметрам. Одним из первых промышленных станов подобного типа был спроектирован, изготовлен и пущен в эксплуатацию в 1959 году ВНИИ-МЕТМАШем трехвалковый стан поперечно-винтовой прокатки 120 для прокатки круглых периодических профилей на Днепровском металлургическом заводе им. Дзержинского в г. Днепропетровске (Украина), заготовкой для него служит круг 120, длиной 2200 мм, а изделиями его являются круглые периодические валы-оси диаметром 40-120 мм, длиной 4000 мм [10].

В эти же годы трехвалковые станы поперечно-винтовой прокатки установлены на многих машиностроительных заводах: Конотопском заводе «Красный металлист», Московском заводе малолитражных машин, Минском тракторном заводе (Белоруссия), Челябинском электромашинно-строительном заводе и др.

К началу 80 гг. в СССР было пущено в эксплуатацию более десяти трехвалковых станов поперечно-винтовой прокатки [10].

Подобное состояние внедрения этих станов стало возможным благодаря тому, что процесс поперечно-винтовой прокатки круглых периодических профилей на специально трехвалковых станах позволяет исключить операцииковки и черновой механической обработки на металлорежущих станках с экономией металла до 25%, ранее уходящего в стружку. Более того, получаемый периодический прокат из углеродистых и легированных сталей характеризуется высокой точностью геометрических размеров и качественной поверхностью [14].

За рубежом примерно в этот же период времени происходит также достаточно активное внедрение станов поперечно-винтовой прокатки в металлургической промышленности: в США – г. Нью-Милфорд, штат Коннектикут, фирма «Scovill Manufacturing – 1959 г, г. Парамант, штат Калифорния, фирма «Anaconda American Bzass», в Великобритании – г. Уинсфорд, фирма «Delta Tubes ltd» – 1964 г., в Японии – г. Модзи, фирма «Kobe Steel Works Ltd» – 1965 г., во Франции – г. Живе (деп. Арденны) – 1965 г.

В 1962 г. в США установлен лабораторный стан с диаметром рабочих валков 178 мм и мощностью электродвигателя 37 кВт для прошивки заготовок диаметром 38 мм из различных сталей [3]. В 1963 г. фирмой «Юнайтед Стейтс стил» было начато проектирование и изготовление промышленного трехвалкового стана поперечно-винтовой прокатки, который в 1968 г. был введен в эксплуатацию совместно с трехвалковым раскатным станом [3].

Трехвалковый прошивной стан имеет следующую техническую характеристику:

Максимальный диаметр рабочих валков, мм	508
Угол подачи валков, град.	0-15
Мощность электродвигателя, кВт	1840
Расстояние между валками в пережиме, мм	76-152
Скорость вращения, об/мин	300/600
Максимальная длина, м:	
заготовки	3,6
гильзы	6

Рабочая клеть этого стана (рис. 4) представляет собой станину 1, нижняя часть которой установлена на фундаменте; верхняя крышка 2 откидывается на 180° на стойку 3. Рабочие валки 4 смонтированы на подшипниках качения и снабжены отдельными упорными подшипниками для

восприятия осевых усилий, а регулировка угла подачи осуществляется механизмом разворота кассеты валка с последующим стопорением гидроцилиндром.

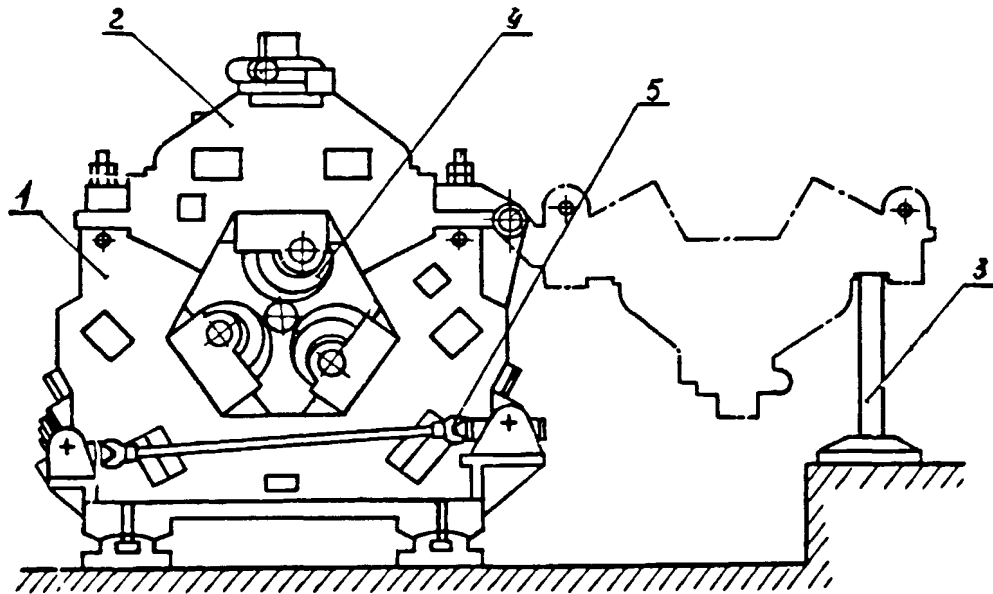


Рис. 4 Рабочая клетка трехвалкового прошивного стана с откидной верхней крышкой (США).

Перемещение трех валков может производиться одновременно от отдельного привода 5, а величина зазора между рабочими валками в пережиме регулируется нажимным устройством и фиксируется специальным указателем. Привод осуществляется от электродвигателя через шестеренную клетку и универсальные шпиндели.

В Германии фирмой «Маннесманн-Меер» совместно с фирмой «Шталь унд роренверк» спроектирован и изготовлен трехвалковый прошивной стан для прокатки с жесткими допусками толстостенных труб, служащими заготовкой для наружных колец подшипников качения. Диаметр исходных заготовок 250 мм. Трехвалковый стан с незначительными перестройками входной и выходной сторон может быть применен для прошивки на короткой конической оправке или для раскатки на цилиндрической оправке (рис. 5).

При использовании трехвалкового стана в качестве прошивного входная сторона снабжается толкателем и входным желобом, а выходная – выводной проводкой и стержнем с упорным механизмом; при применении стана в качестве раскатного входная сторона снабжена удерживающей головкой и вводным желобом, а выходная – выводной проводкой. Рабочие валки имеют первый входной конус, гребень, второй входной конус, пережим и выходной конус.

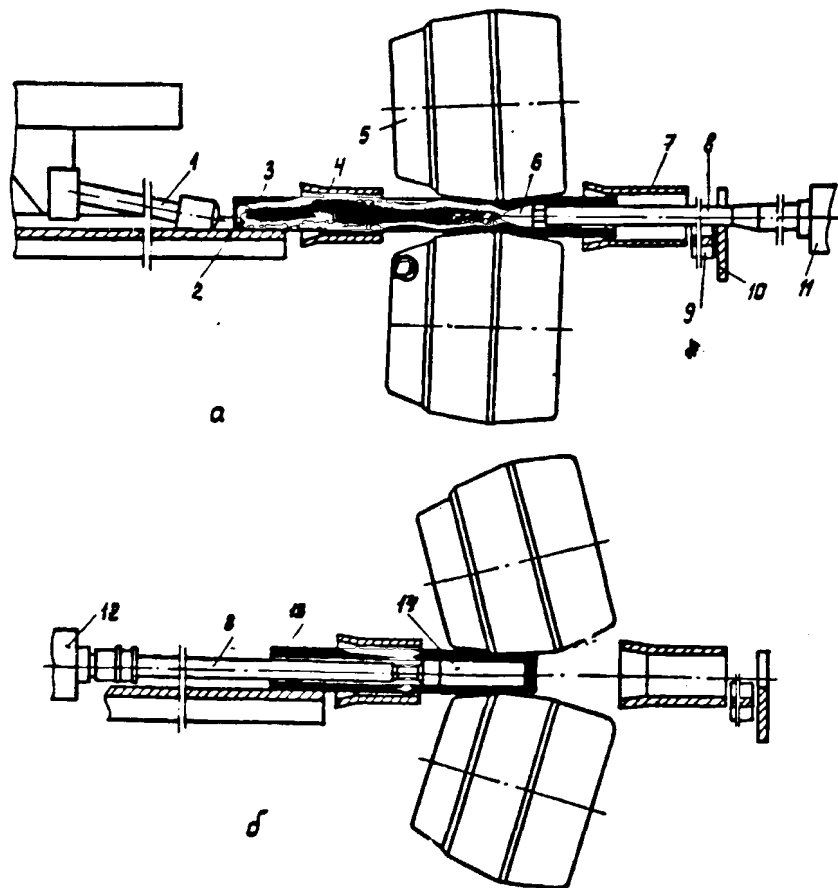


Рис. 5 Схемы процессов прошивки (а) и раскатки (б) на трехвалковом стане (Германия): 1 – заталкиватель; 2 – вводный желоб; 3 – заготовка; 4 – вводная проводка; 5 – валок; 6 – оправка; 7 – выводная проводка; 8 – стержень; 9 – выводной желоб; 10 – сбрасыватель гильз; 11 – упорный механизм; 12 – удерживающая головка; 13 – гильза; 14 – цилиндрическая оправка.

При прошивке рабочие валки устанавливаются таким образом, что заготовка деформируется во втором входном конусе, пережиме и выходном конусе (рис. 5 а), а при раскатке в первом входном конусе, на гребне и во втором входном конусе (рис. 5 б) [3].

В конце 60-х гг. в зарубежной печати появляются сведения о разработках новых конструкций трехвалковых прошивных станов или рабочих клеток, например, в Англии: разработана конструкция рабочей клетки трехвалкового прошивного стана, которая состоит из верхней съемной части, двух нижних частей, установленных на фундаменте и стянутых болтами, двух клиновых механизмов с гидроприводом для крепления верхней и нижней частей. В месте стыка станины на верхней части имеется проушина с отверстием, а на нижней – паз для входа проушины, в которую входит клин [3].

Изготовлен трехвалковый стан поперечно-винтовой прокатки для производства стальных труб [3]; в Японии: [3] – «О проведении экспериментов на трехвалковой клетке стана поперечно-винтовой прокатки с параллельным расположении осей рабочих валков относительно оси прокатки», о введении в эксплуатацию трубопрокатной установки, включающей в своем составе трехвалковые прошивной и раскатной станы для производства труб из шарикоподшипниковых сталей и специальных сплавов [3], в Германии – трехвалковый прошивной стан используется для получения тонкостенных гильз методом совмещения процесса прошивки и раскатки с помощью особой калибровки рабочих валков, имеющих два конуса прошивки, гребень для утонения стенки гильзы и цилиндрического пояса с целью выравнивания стенки, и прошивной оправки с конусной частью и длинным цилиндрическим участком. При таком способе тонкостенные гильзы получают за один проход [3].

В Англии работают несколько трубопрокатных установок, в состав которых входят трехвалковые прошивные и раскатные станы:

на заводе Десфорд фирмы Тьюб Инвестментс для производства нержавеющей труб длиной 5,2 м из заготовок диаметром 76-178 мм и длиной 3 м [3];

на заводе Уэднсфилд фирмы «Уэлдлис стил тьюб» установлена с непрерывным станом, в составе которого работает трехвалковый прошивной стан для производства углеродистых и низколегированных стальных труб длиной до 22,9 м из заготовок 113,3-159,2 мм [3].

Имеются сведения об изготовлении трехвалкового прошивного стана и пуска его в эксплуатацию в Испании (г. Кордова). Подобная тенденция в полной мере проявляется и в других, развитых в промышленном отношении, странах (Чехия, Италия и др.).

Параллельно с процессом активного внедрения станом поперечно-винтовой прокатки с трехвалковой схемой, продолжают вступать в эксплуатацию также и прошивные станы с двухвалковой схемой:

двухвалковый прошивной стан 102 для прошивки титановых труб – г. Никополь (Украина); двухвалковый стан для производства стальных труб – г. Первоуральск (Россия); двухвалковый прошивной стан – г. Кирс, завод «Кирскабель», Кировская область (Россия); двухвалковый прошивной стан для прошивки медных труб – г. Санкт-Петербург, завод ОЦМ «Красный выборжец» (Россия).

Использование двухвалковых прошивных станом возможно и в комбинациях с трехвалковыми станами поперечно-винтовой прокатки. Так, ЦНИИчерметом предложена технология получения тонкостенных труб за две операции на двух, последовательно расположенных, станах поперечно-винтовой прокатки – трех- и двухвалковом. На трехвалковом прошивном стане производится гильза с обычной толщиной стенки, а на двухвалковом стане эта гильза раскатывается в тонкостенную трубу требуемых размеров [12].

Благоприятные условия деформации при прошивке на трехвалковом стане дают возможность использовать эти станы для получения труб из ма-

териалов, имеющих низкую пластичность и повышенную склонность к налипанию на рабочий инструмент. К таким материалам относятся высокопрочные алюминиевые сплавы типа Д16, АМГ и др.

В авиационной промышленности, в частности, на заводе легких сплавов ВИЛСа и других заводах, трубы из алюминиевых и титановых сплавов получали методом прессования с последующим волочением и прокаткой на станах холодной прокатки (ХПТ).

Изготовление труб по этому технологическому процессу крайне неэкономично вследствие малой производительности и небольшого выхода годного. В качестве промежуточного был предложен новый техпроцесс, устраняющий сверление отверстий в прутке (заготовке), заменяющий прессование на прошивку на стане поперечно-винтовой прокатки с последующей раскаткой полученных гильз и чистовой обработкой на стане ХПТ.

Первые попытки получения гильз из указанных сплавов на прошивном двухвалковом стане с последующей раскаткой их на непрерывном стане были [13] осуществлены во ВНИИТИ еще в 1956-57 гг. [13].

Однако, доказав возможность получения труб таким способом, требуемых результатов по качеству получаемых труб не было достигнуто, вследствие чего работы в дальнейшем были приостановлены.

В течение 1966-68 гг. сотрудниками МВТУ им. Баумана совместно с ВИЛСом и ВНИИМЕТМАШем был проведен ряд комплексно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, в том числе предложен и опробован новый технологический процесс изготовления бурильных труб из высокопрочных алюминиевых сплавов (Д16) для нефтедобывающей промышленности и геологоразведочных работ, который базируется на процессе поперечно-винтовой прокатки изделий периодического сечения, осуществляемый на трехвалковых станах [14].

Эксперименты проводились на трехвалковых станах «10», «50». Позднее ВНИИМЕТМАШем на основании данных экспериментов была

создана конструкция опытного трехвалкового стана «120» для поперечно-винтовой прокатки труб 40-60 мм с наружными и внутренними законцовками на короткой регулируемой оправке, с применением подпора.

Помимо этого, после проведения вышеуказанных исследовательских работ, для ряда заводов были выбраны различные схемы агрегатов поперечно-винтовой прокатки: для Каменск-Уральского металлургического завода (КУМЗ) – двухвалковая прошивная клеть и трехвалковая раскатная клеть; для Верхне-Салдинского металлургического производственного объединения (ВСМПО) – трехвалковая прошивная клеть и трехвалковая раскатная клеть [15, 16].

В течение длительного времени считалось, что способ поперечно-винтовой прокатки пригоден только для производства бесшовных гладких труб (гильз).

Однако начало 60 гг. характеризовалось появлением совершенно новых технологических процессов и, на их основе созданием специальных станов, работающих на тех же принципах поперечной и, особенно, поперечно-винтовой прокатки с рабочими клетями, выполненными или двухвалковыми или трехвалковыми, и предназначенных для производства изделий специального машиностроительного назначения.

Большинство из этих станов разработаны и внедрены ВНИИМЕТ-МАШем. Среди них:

станы для прокатки заготовок переменного сечения в валках с клиновидными калибрами (двухвалковая схема);

станы для прокатки сферических (круглых) тел-шаров для мельниц и шарикоподшипников (двухвалковая схема прокатки);

станы для прокатки коротких цилиндрических тел вращения (штулки гладкие и профилированные велосипедные, штифты, и др.) – двухвалковая схема прокатки);

станы для прокатки профилей с винтовой поверхностью (резьбовые изделия) – двух- или трехвалковые схемы прокатки;

станы для прокатки червячных валов и фрез – двух- или трехвалковая схема прокатки;

станы для прокатки ребристых труб – трехвалковая схема прокатки.

Эти станы получили широкое применение в нашей стране и за рубежом. Так, станы поперечно-винтовой прокатки для производства шаров были установлены на Московском и Куйбышевском подшипниковых заводах, на металлургических заводах «Азовсталь» (Украина), Нижне-Тагильском металлургическом комбинате и др.

В 60-70-х гг. подобные станы были изготовлены нашими заводами тяжелого машиностроения и поставлены в следующие страны: в Англию – стан 25-50, в Чехословакию – стан 40-80, в Болгарию – стан 80-125. Поставлен стан для производства мелющих шаров в Италию.

Двухвалковый стан для прокатки заготовок цилиндрических штифтов 8-20 мм, был смонтирован на московском заводе «Станконормаль» [10].

ВНИИМЕТМАШем разработан целый ряд типоразмеров двух- и трехвалковых станов для горячей и холодной прокатки изделий с винтовой поверхностью диаметром 20-180 мм: 2ГПВ-30, 3ГПВ-40, 2ХПВ-20, 2ХПВ-25, 3ХПВ-30, а также трехвалковых станов для горячей и холодной прокатки высоко- и низкорейбристых труб из черных и цветных металлов: ГПРТ-20-40, ХПРТ 8-12, ХПРТ 12-20Н, ХПРТ 20-40Н и др.

Станы поперечно-винтовой прокатки для производства ребристых труб были установлены на многих машиностроительных заводах, в том числе, на заводе «Электросила» (г. Санкт-Петербург), московском заводе «Компрессор», запорожском (Украина) трансформаторном заводе, Троицком электро-механическом.

Производство и применение подобных станов получило широкое применение и за рубежом – в Англии, США, Чехии, Германии и др. [10].

Таблица 1

Техническая характеристика станов для прокатки изделий машиностроения

Страна	Металлургическая и машиностроительная фирма, завод	Тип стана	Год выпуска	Исходная продукция, размеры, мм	Сортамент готовой продукции, размеры, мм	Число рабочих клетей	Тип рабочей клетки	Наибольшая скорость прокатки, м/сек	Общая мощность главных приводов, кВт	Масса механического оборудования, т	Часовая производительность	Фирма, завод-изготовитель	Примечания
Англия	Walter Sompers	Однолетевой кольцеобразный	Нет св	Нет св	Кольца, 432/2000 x 305	1	Двухвалковая с откатами катнорамн	Нет св	Нет св	Нет св	Нет св	Walter (ФРН)	-
Италия	Нет св.	Для прокатки мельничных шаров	Нет св	Нет св	Мельничные шары, диаметр 20-80	1	Двухвалковая	То же	То же	То же	То же	Danieli (Италия)	-
СССР	Им. Дзержинского (Днепро-дзержинск)	Трехвалковый 120 для прокатки круглых периодических профилей	1959	Заготовки, круги 120, длина 2200	Круглые периодические вали, оси и др., диаметр 40-120, длина 4000	1	Трехвалковая ПИВ1	6	290	37	4,5 т	ВНИИ-МТИМАШ (СССР)	-
	«Азовсталь» (Жданов)	Для прокатки шаров диаметром 60-125 мм	1959	Заготовки, длина 3000-6000	Мельничные шары, диаметр 60-125	1	Двухвалковая 530-690 ПИВ1	40-85	885	160	2400-3600 шт.	То же	-
	ПТЗ-1 (Москва)	Для прокатки шаров диаметром 25-50 мм	-	Круглые заготовки, длина 1000-5000	Заготовки подшипниковых шаров, длина 25-45	1	Двухвалковая ПИВ1	75-180	160	27	4500-10800 шт.	То же	-
	Машиностроительный (Ижевск)	Универсальный для холодной прокатки винтов с крупной резьбой	1960	Круглые заготовки	Винты домкратов с трапециевидальной резьбой ТРАП 36x36 и ТРАП 57x6, длина 200	1	То же	12-190	40	9,6	100 шт.	То же	В 1966 г. передан заводу угольного машиностроения для горячей прокатки винтов 44x8 мм при производительности 60 шт/час
	Велоспелный (Харьков)	Для прокатки заготовок велоспелных втулок	1961	Гильзы, 60/39x2500	Заготовки велоспелных втулок	1	Двухвалковая с винтовыми катнорамн	-	320	65	1800 шт	То же	-
	«Фрезер» (Москва)	Для прокатки червячных фрез с модулем 8-10 мм	1961	Круглые кованые заготовки, 60-140, длина 600-800	Заготовки червячных фрез, модуль до 8-10	1	Трехвалковая ПИВ1	-	80	16,4	60-80 шт	То же	-
	Комбайновый (Херсон)	Для прокатки звездочек	1964	Дисковые заготовки	Звездочки цепных передач, наружный диаметр 130-150, число зубьев 14-25	1	Двухвалковая с радиальной подачей валков	-	36	-	60-80 шт	То же	-
	«Редуктор» (Ленинград)	Для прокатки червяков с модулем 3-8 мм	1966	Круглые заготовки	Червяки, модуль 3-8	1	Трехвалковая поперечной прокатки	-	67	20	30-60 шт	То же	-
	Электромеханический (Троицк)	Для прокатки высокоробустых труб из цветных металлов	1966	Трубы из алюминия, меди и биметалла, наружный диаметр 15-32, толщина стенок 1,5-2,5	Ребристые трубы, диаметр 15-32, толщина стенок 1,5-2,5, высота ребер до 12, шаг ребер 2,5-5	1	То же	-	30	9,4	60-120 м	То же	-
	Дизелестроительный (Рига)	30-200 для прокатки прямозубчатых колес	-	Штампованные круглые заготовки	Цилиндрические зубчатые колеса, наружный диаметр 30-200, модуль до 3,5	1	Двухвалковая с радиальной подачей валков	-	10	4,6	100 шт	То же	-

Выводы:

1. Соискателем выполнено полное патентное исследование и изучение банка данных изобретений 21 промышленно развитых стран (США, Англия, Германия (ФРГ, ГДР), Япония, Франция, Италия, Испания, Китай, Чехословакия, Болгария, Польша, Венгрия, Швеция, Австралия, Финляндия, Норвегия, Югославия и др.) по классам (подклассам): металлургическое прокатное оборудование, прокатные станы, поперечно-винтовая прокатка, прошивка гильз (труб) за 1920-1970 гг.

2. В вопросах технологии поперечно-винтовой прокатки (производство гильз, труб) прослеживалась явная и преимущественная тенденция более глубокого изучения процесса трехвалковой схемы прокатки, в т.ч. изучение влияния внешних дополнительных прилагаемых усилий подпора и натяжения на напряженно-деформационное состояние прокатываемого металла и, с целью достижения лучших показателей, производственного процесса – снижения мощностей прокатки, энергозатрат, повышения производительности и т.п.

3. В вопросах создания оборудования для поперечно-винтовой прокатки прослеживается постоянное стремление конструктивно улучшать рабочие клетки, в основном, трехвалковые, с целью достижения максимального удобства в эксплуатации их, сокращения времени на перевалках рабочих валков, облегчения веса конструкции и др.

4. На момент патентного исследования указанных стран каждый действующий стан поперечно-винтовой прокатки мог работать только по одной из двух схем прокатки: или двухвалковой или трехвалковой.

5. Достижение лучших технологических показателей при прокатке труб реализуется чаще всего на трубопрокатных установках, в составе которых обязательно присутствуют одновременно и трехвалковая клеть и двухвалковая (например, для производства тонкостенных труб).

6. На период патентного исследования ни в одной стране не имелось ни одной конструкции рабочей клетки поперечно-винтовой прокатки, которая бы давала возможность попеременно прокатывать изделия по разным схемам: двух-, трех-, или четырехвалковой.

7. Появление новых технологических процессов для производства изделий специального машиностроительного назначения (штифты, втулки, мелющие шары и шарикоподшипники, изделия с винтовыми поверхностями, ребристые трубы) резко расширило технологические возможности, особенно, двухвалковой схемы поперечно-винтовой прокатки, помимо, основной, классической операции – прошивки гильз, выполняемой до этого.

8. Результаты патентного исследования банка данных различных стран в вопросах поперечно-винтовой прокатки автором проанализированы и систематизированы в прилагаемой схеме (рис. 6).

1.2. Обоснование необходимости создания универсального стана поперечно-винтовой прокатки

Широко применяемые в черной и цветной металлургии прошивные станы поперечно-винтовой прокатки конструктивно изготовлены таким образом, что каждый из них (рабочая клетка) может работать только по одной из двух известных схем прошивки: двухвалковой или трехвалковой. Каждая из них имеет свои достоинства (преимущества) и недостатки.

К достоинствам двухвалковых прошивных станов поперечно-винтовой прокатки можно отнести следующее:

упрощенность конструкции рабочей клетки, ее привода и переналадки стана;

большая производительность стана;

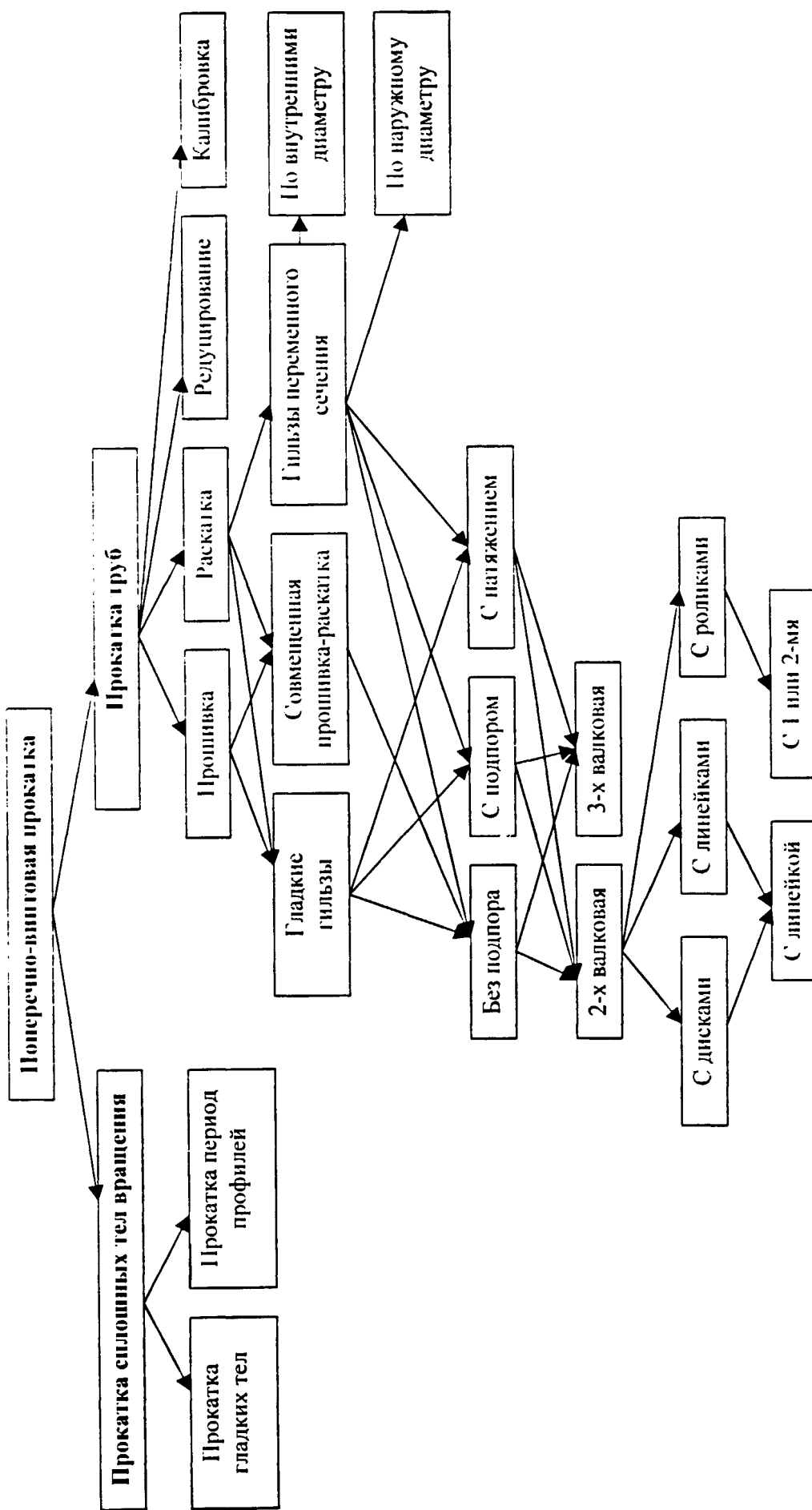


Рис. 6
 Схема методов и способов поперечно-винтовой прокатки, применяемых на различных 2-х валковых и 3-х валковых станах

меньшие нагрузки на рабочие валки и, что особенно важно, на прошивную оправку в 1,3-1,7 раза при прочих равных условиях [16];

возможность получения тонкостенных труб в комбинации с трехвалковым прошивным станом после прошивки гильз с обычной толщиной стенок гильз на трехвалковом прошивном стане [12];

возможность (помимо основной классической операции – прошивки) на рабочей клети с двухвалковой схемой прокатки изготавливать отдельные виды продукции специального машиностроительного назначения.

Преимущества трехвалковых станов следующие:

меньшее скольжение металла относительно инструмента и отсутствие неподвижных опорных направляющих линеек резко сокращает налипание металла на инструмент, что увеличивает срок его службы и улучшает за счет этого качество поверхности изделий;

гильзы, прошитые на прошивных станах поперечно-винтовой прокатки с трехвалковой схемой имеют меньшую разностенность в сравнении с гильзами, прошитыми на двухвалковых станах;

схема напряженного состояния металла заготовки более благоприятна, нежели при двухвалковой схеме прошивки, что позволяет работать на трехвалковых станах при больших обжатиях;

значительно меньшая степень вероятности вскрытия внутренней полости заготовки или полное ее устранение при больших обжатиях, что в свою очередь исключает на внутренней поверхности гильз появление плен и закатов, и, как следствие этого, лучшее качество внутренней поверхности и гильз и затем – труб;

возможность получения труб периодического сечения, т.е. с разными диаметрами (как наружными, так и внутренними) по длине изделия.

Из вышеизложенного логически следует, например, что толстостенные гильзы (трубы) рациональнее прошивать на двухвалковых прошивных

станах, так как при прочих равных условиях в этом случае давление на прошивную оправку (иглу) меньше, чем при трехвалковой схеме прошивки. Это очень важное обстоятельство, поскольку, чем толще стенка гильзы (трубы) при неизменном наружном диаметре заготовки, тем меньше внутренний ее диаметр, а значит и меньше диаметр стержня оправки. При меньших давлениях (осевое усилие на оправку) на оправку, возникающих именно при двухвалковой схеме, продольная жесткость и устойчивость стержня оправки будут выше, чем при прошивке гильз таких же внутренних размеров на трехвалковом прошивном стане.

Естественно возникает вопрос: нельзя ли создать такой универсальный стан поперечно-винтовой прокатки, рабочая клетка которого могла бы объединить (совместить) поочередно все вышеуказанные достоинства и преимущества и двухвалковой, и трехвалковой схем прокатки (прошивки), применяя поочередно для каждого конкретного условия (материал гильз, труб, их сортамент, требования к качеству поверхностей изделий и т.д.) наиболее оптимальную схему прошивки-прокатки, т.е. двух – или трехвалковую?

Варьирование этих двух схем прошивки-прокатки на одной рабочей клетке (стане) позволило бы: значительно уменьшить капиталовложения на изготовление универсального стана (по существу изготовить необходимо один стан с двумя (или больше) схемами прокатки – двухвалковой и трехвалковой схемами прошивки вместо двух станов, каждый из которых был бы только с одной схемой прошивки), уменьшить производственные требуемые площади, снизить затраты на обслуживание оборудования, расширить сортамент выпускаемой продукции и технологические возможности в целом, снизить энергозатраты на единицу выпускаемой продукции, увеличить срок службы рабочих инструментов и т.д.

Получение продукции поочередно по двум схемам прошивки-прокатки на одном стане (на одной рабочей клетке) кроме практической целесообразности, имело бы и научно-теоретическую ценность.

Дело в том, что в реальности для изучения общих и отличительных закономерностей процессов прошивки-прокатки по обеим схемам, исследователям и ученым приходилось проводить свои исследования на совершенно разных двухвалковых и трехвалковых станах, находящихся, во-первых, в различных географических точках (например, двухвалковый стан в г. Никополь, а трехвалковый стан в г. Днеродзержинске), во-вторых, имеющих совершенно различные технические и технологические параметры (мощность, диаметры, материалы и скорость вращения рабочих валков, различные конструкции станин, материалы, из которых сделаны рабочие клетки, различная степень их упругой деформации при работе и пр.), поэтому при сравнении получаемых результатов экспериментов, естественно, допускались определенные упрощения и погрешности, для устранения которых и чистоты экспериментов исследователями вводились различные поправочные коэффициенты.

И только на одном универсальном стане поперечно-винтовой прокатки, который бы дал техническую и технологическую возможность поочередно проводить прошивку-прокатку по двухвалковой и трехвалковой схемам, возможно исследование различных параметров прокатки обеих схем и давать их сравнительный анализ, проведенных при совершенно одинаковых технических и технологических параметрах (материалов, их свойства, диаметры валков, конструкции оправок, скорость деформаций, углы подачи и т.д.), поэтому необходимость введения поправочных коэффициентов отпадает, а точность результатов исследований значительно возрастет.

Глава 2. Конструктивные и технологические особенности универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60

2.1. Описание конструкции рабочей клетки

Все изложенное в п.2 главы 1, т.е. использование преимуществ двухвалковой и трехвалковой схем прокатки на одном и том же стане стало возможным в результате разработки оригинальной конструкции рабочей клетки [18], ставшей основой спроектированного универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60.

Рабочая клетка прошивного стана ПВП 20-60 (рис. 7) (вариант I) включает в себя: основание станины 1, которая закрывается крышкой 2. Барабаны – кассеты, выполненные в виде гидроцилиндров 3, с закрепленными в них валками 4, устанавливаются в специальных гнездах станины, выполненными под углами 120° друг относительно друга (при трехвалковой схеме прошивки-прокатки) и под 180° друг относительно друга при настройке стана на двухвалковую схему (рис. 7а) прокатки. Всего гнезд в станине четыре. Шток 5 поршня 6, помещенный в гидроцилиндр 3, закреплен в крышке 7 гнезда станины.

При необходимости сведения или разведения рабочих валков, рабочая жидкость из гидросистемы под давлением через одно из отверстий в штоке 5 поступает в рабочую полость гидроцилиндра 3, перемещая его вместе с закрепленным на нем валком 4. При прокатке гладких изделий в обеих рабочих полостях гидроцилиндров 3 устанавливается статическое равновесие, т.е. валки настроены на постоянный размер.

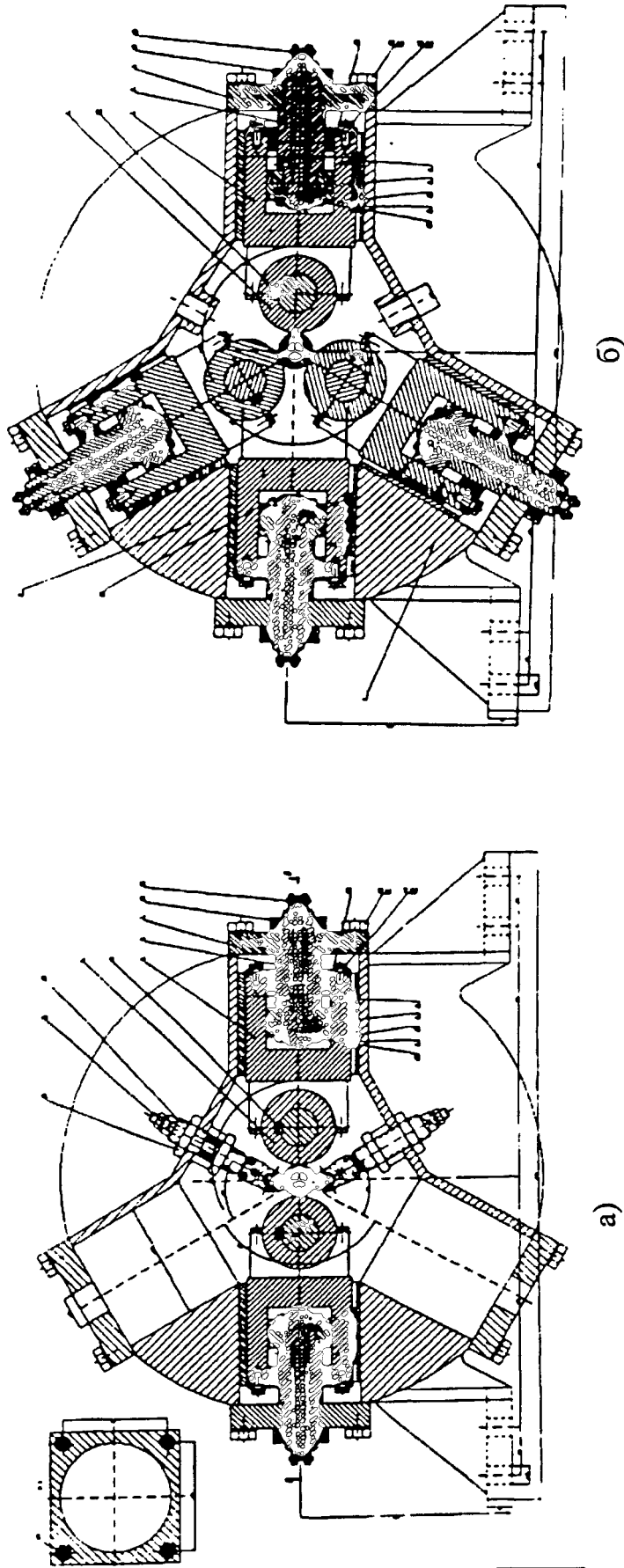


Рис. 7. Универсальная рабочая клетка стана ПВП 20-60 (Вариант 1)
а - Двухвалковая схема; б - Трехвалковая схема

Для осуществления разворота рабочих валков на необходимый угол подачи, барабаны-кассеты (гидроцилиндры) 3 помещены в цилиндрические стаканы 8. Вращением стаканов 8 вокруг своей оси с помощью болтов через цилиндрическую шпонку 9 осуществляется разворот валков на необходимый угол подачи.

На рис. 7б рабочая клеть стана настроена на трехвалковую схему прошивки-прокатки.

Для настройки рабочей клетки на двухвалковую схему прошивки-прокатки (рис. 7а) необходимо оба наклонно расположенные барабаны-кассеты (гидроцилиндры) 3 с рабочими валками 4 извлечь из гнезд и один из них вставить во второе вертикально расположенное гнездо. После этого в крышку 2 и основание 1 устанавливаются два опорных вращающихся ролика 10, которые настраиваются на необходимый размер. Применение вращающихся опорных бочкообразных роликов вместо неподвижных опорных линеек, применяемых в двухвалковых прошивных станках, дает возможность избежать налипания металла на инструмент, улучшает качество поверхности труб.

При этом, один из трех универсальных шпинделей, приводящих во вращение рабочие валки отключается.

На рис. 8 показана рабочая клеть при двухвалковой схеме настройки в вертикальном сечении, где: 1 – основание станины клетки, 2 – гидроцилиндр – барабан-кассета, 3 – рабочие валки, 4 – поршень, 5 – стакан поворотный, 6 – гайка стопорная, 7 – крышка гидроцилиндра, 8 – обойма, 9 – крышка стакана, 10 – манжета, 11 – вал рабочего валка, 12 – гайка со стопорным кольцом, 13 – подшипник, 14 – стакан подшипников, 15 – кольцо опорного ролика, 16 – опорный ролик, 17 – болт, 18 – гайка, 19 – крышка стакана, 20 – подшипник опорный, 21 – гайка со стопорным кольцом.

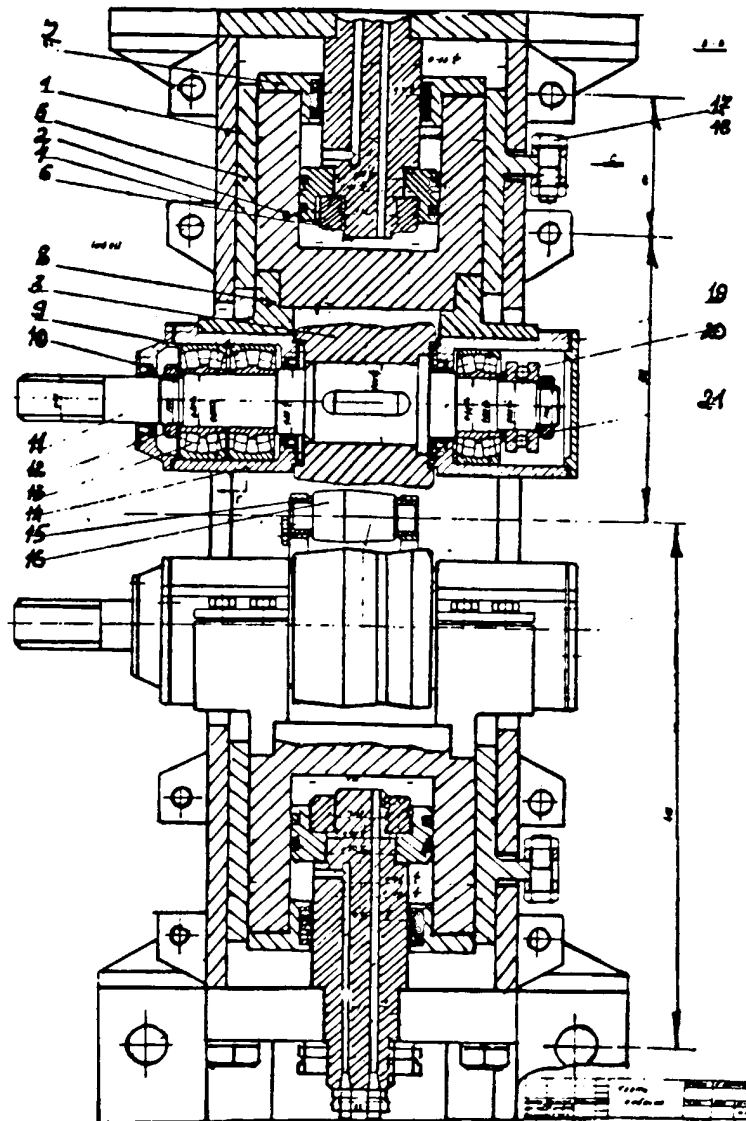


Рис. 8 Клеть рабочая универсального стана поперечно-винтовой прокатки
(вертикальный разрез)

Та же самая идея возможности поочередного совмещения и выполнения на одной рабочей клети нескольких схем прокатки-прошивки заложена в другой модификации универсальной рабочей клети, предложенной автором совместно с МИСиСом. Данная рабочая клеть может обеспечить поперечно-винтовую прокатку при двух-, трех- и четырехвалковой схемах. На рис. 9а изображен общий вид рабочей клети и вид сбоку (рис. 9б)

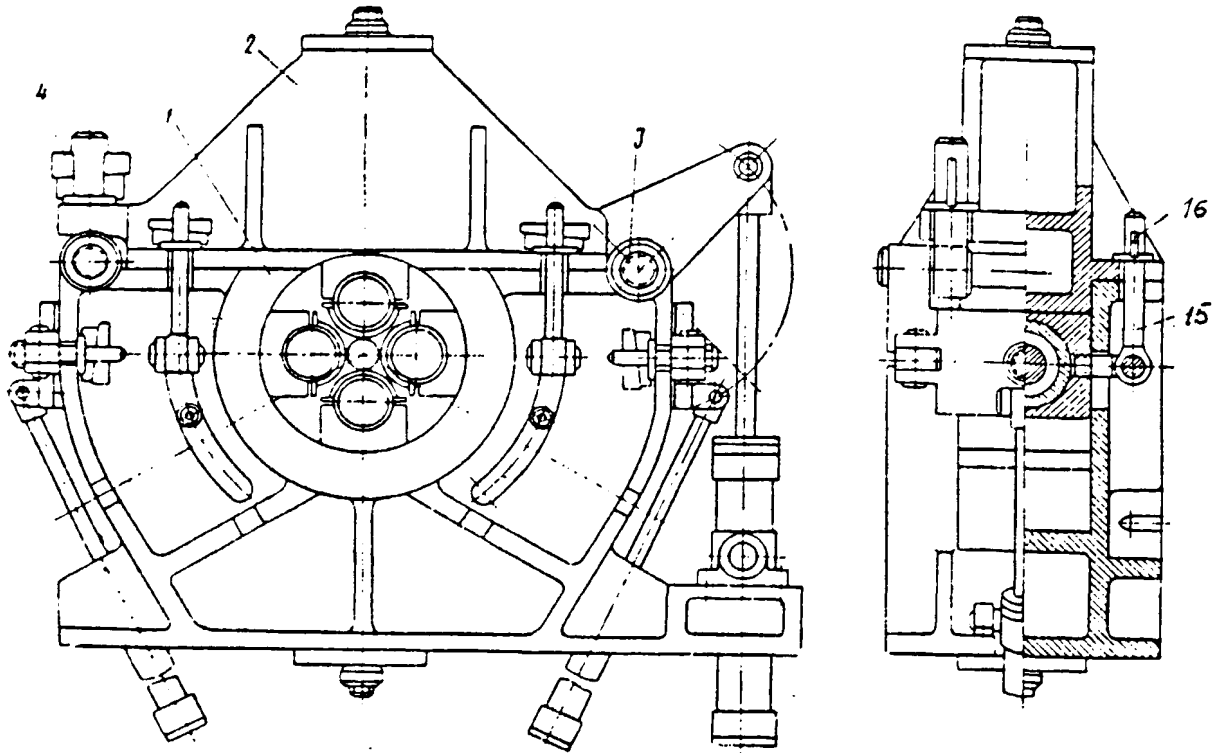


Рис. 9 Общий вид универсальной клетки (вариант II) стана поперечно-винтовой прокатки

а – общий вид, б – вид сбоку

1 – основание станины, 2 – крышка, 3 – шарнирная ось, 4 – клиновой замок, 15 – тяги откидывающиеся, 16 – клинья.

Рабочая клетка (вариант II) включает в себя станину, выполненную разъемной и состоящую из основания 1 и крышки 2, связанных шарнирной осью 3 и клиновым замком 4, кассеты 5 с рабочими валками 6, две из которых смонтированы в станине, две другие – в подвижных опорах 7, установленных в окна станины. На станине выполнены дугообразные желобчатые направляющие 8 с центром на оси прокатки, в которых размещены катки 9 подвижных опор и смонтированы гидроцилиндры 10, шарнирно связанные с подвижными опорами. Механизмы перемещения кассет с валками к оси прокатки, и от нее выполнены в виде гидроцилиндров 11, смон-

тированных в кассетах. Механизм поворота кассет с рабочими валками на угол подачи состоит из реек 12, находящихся в зацеплении с зубчатыми опорами 13, выполненными в теле кассет и винтов 14.

Средства для жесткого стопорения подвижных опор в рабочих положениях выполнены в виде откидывающихся тяг 15 и клиньев 16.

На рис. 10 показана рабочая клеть: а – вид в плане и б – разрез рабочей клетки в сечении А-А. На общем виде (рис. 9) и в сечении А-А (рис. 10б) рабочая клеть изображена настроенной на прокатку по четырехвалковой схеме. Для перенастройки рабочей клетки на прокатку-прошивку по трехвалковой схеме осуществляется следующим образом. Для этого клинья 16 расклиниваются, откидываются тяги 15, освобождая подвижные опоры. Нижняя кассета 5 с рабочим валком с помощью гидроцилиндра 11 опускается в крайнее нижнее положение. С помощью гидроцилиндров 10 подвижные опоры 7 с кассетами и рабочими валками поворачиваются на катках 9 относительно оси прокатки в положение, соответствующее трехвалковой схеме прокатки (рис. 11а), т.е. под 120° по отношению друг к другу. Подвижные опоры закрепляются с помощью тяг 15 и клиньев 16 в новом положении.

Для переналадки на двухвалковую схему прокатки два рабочие валка (верхний и нижний) заменяются линейками 17, которые с линейкодержателями 18 вставляются в расточки кассет 5.

Достоинствами универсальной клетки варианта II является возможность переналадки и работы по трем схемам прокатки: двух-, трех- и четырехвалковой, а также компактность конструкции и быстрая и легкая переналадка с одной схемы на любую из двух оставшихся.

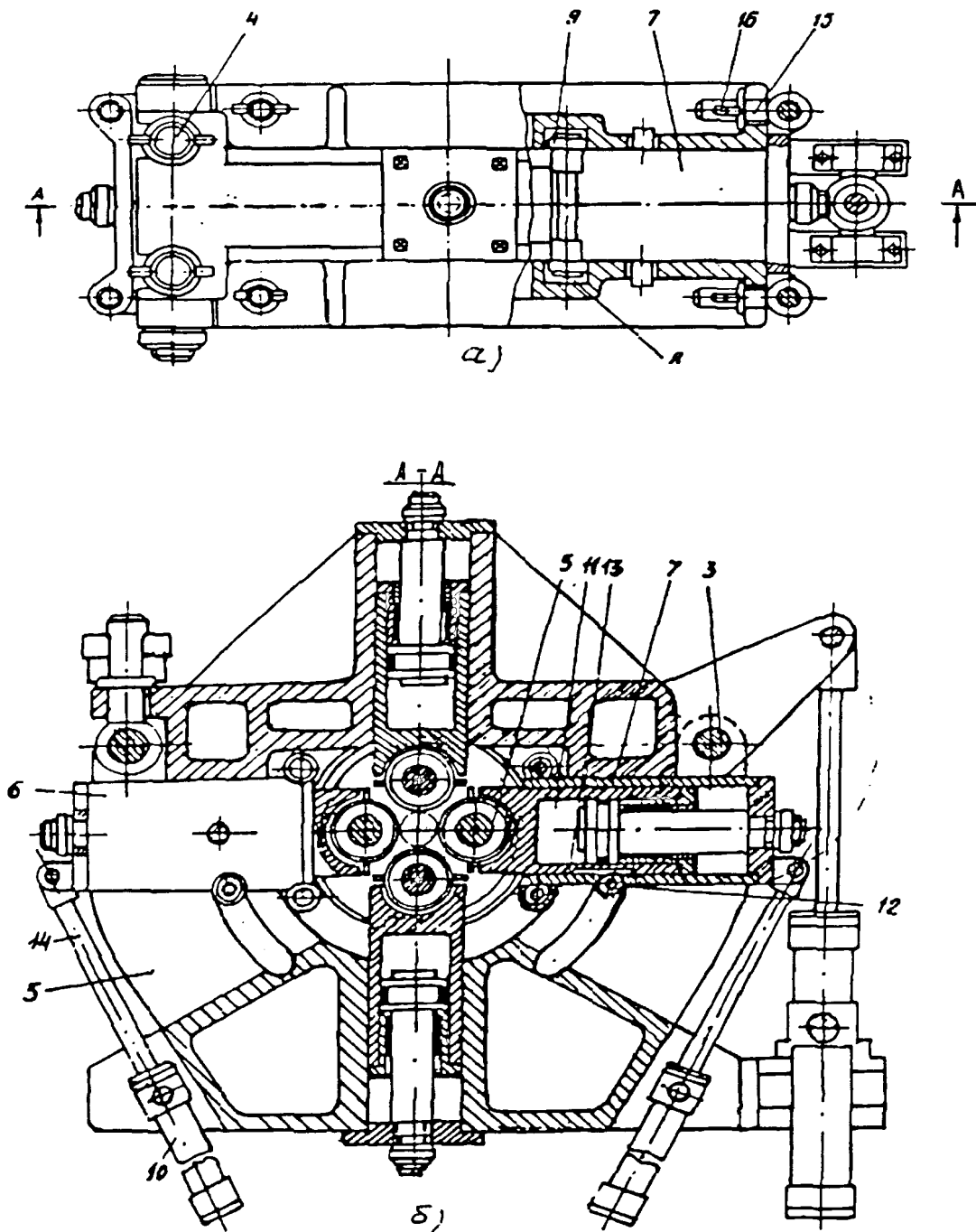


Рис. 10 Универсальная рабочая клетка (Вариант II) а - вид в плане, б - разрез в сечении А-А.

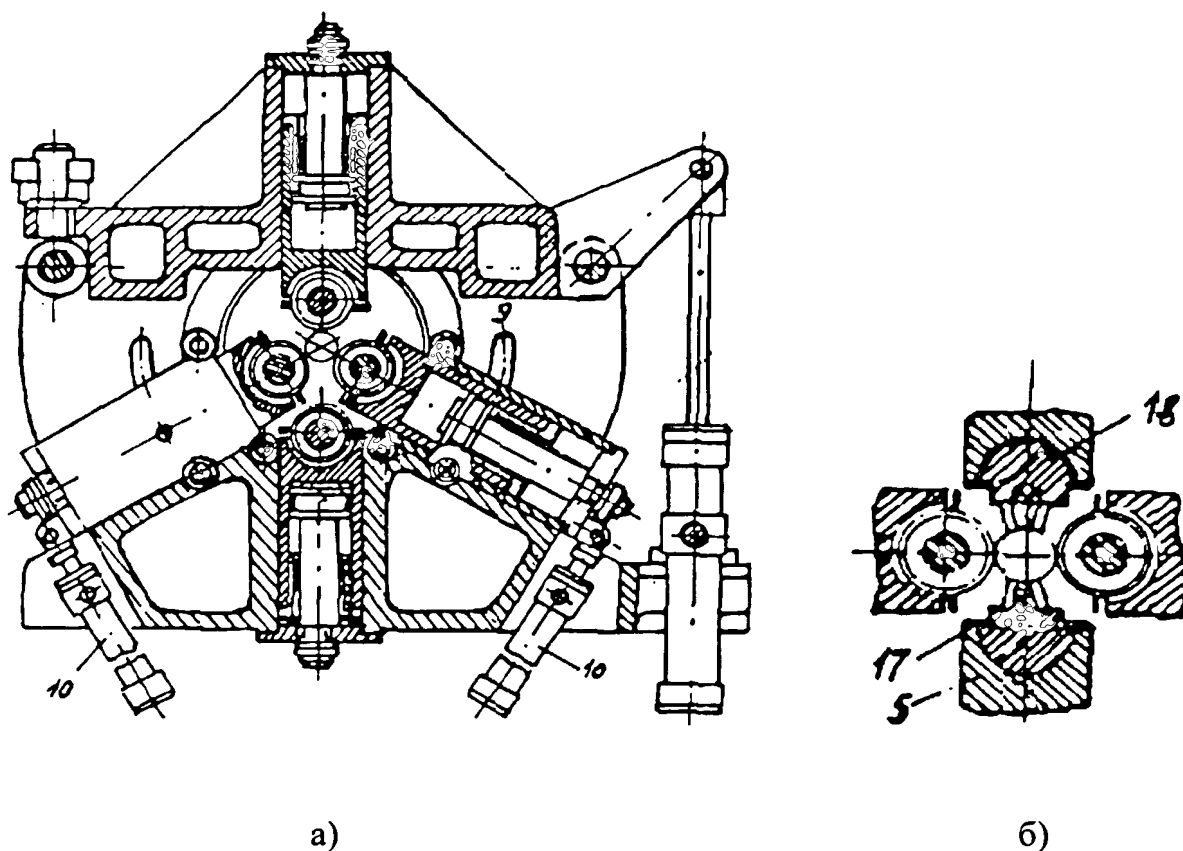
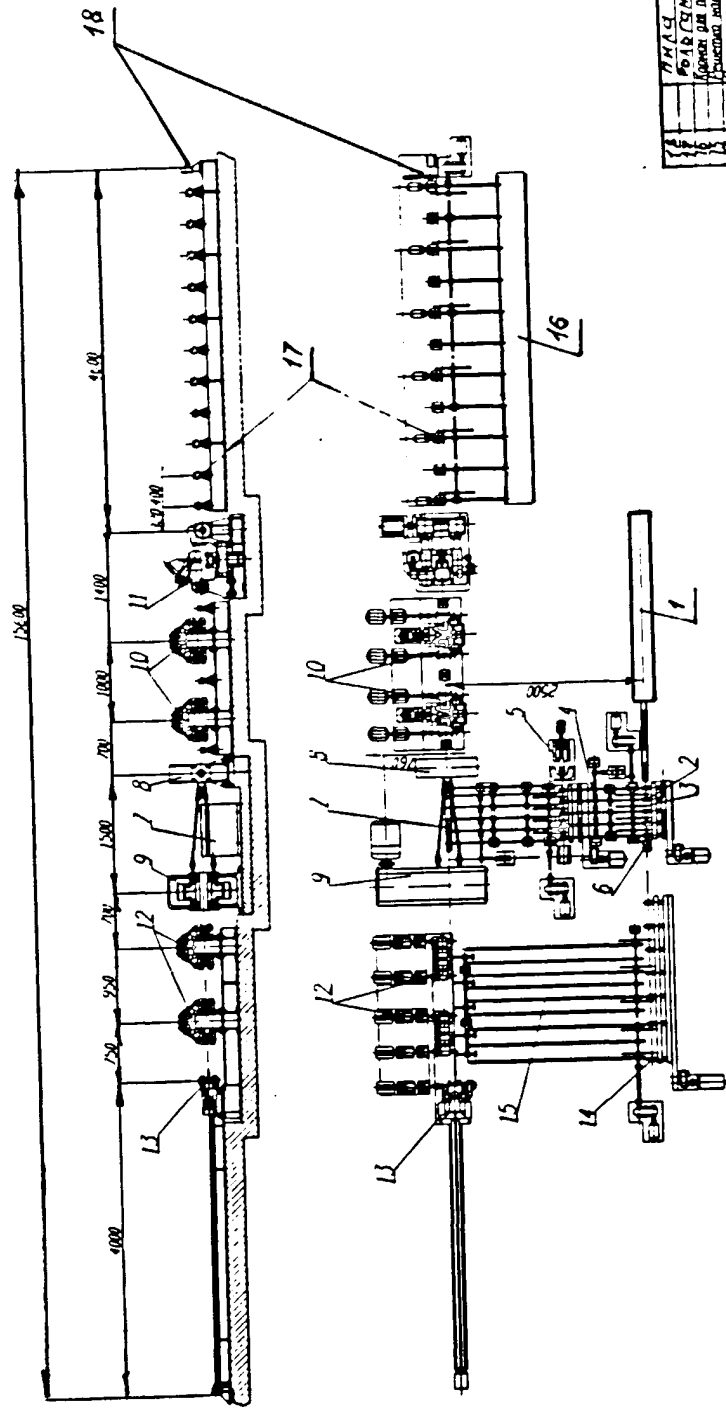


Рис. 11 Универсальная рабочая клеть.

а- трехвалковая схема прокатки; б - двухвалковая схема прокатки
(вариант II клетки).

2.2. Описание конструкции линии универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 (вариант промышленного назначения)

Соискателем спроектирована линия универсального стана поперечно-винтовой прокатки промышленного назначения (рис. 12), использование в которой универсальной рабочей клетки одной из рассмотренных выше конструкций (вариант I и II), позволяет выполнять следующие операции:



1	Корпус для обработки торца
2	Шпиндель
3	Шпиндель для обработки торца
4	Шпиндель для обработки торца
5	Шпиндель для обработки торца
6	Шпиндель для обработки торца
7	Шпиндель для обработки торца
8	Шпиндель для обработки торца
9	Шпиндель для обработки торца
10	Шпиндель для обработки торца
11	Шпиндель для обработки торца
12	Шпиндель для обработки торца
13	Шпиндель для обработки торца
14	Шпиндель для обработки торца
15	Шпиндель для обработки торца
16	Шпиндель для обработки торца
17	Шпиндель для обработки торца
18	Шпиндель для обработки торца

Рис. 12 Линия универсального стана ПВП 20-60 промышленного назначения

Линия
станд

прокатку сплошных тел вращения, в т.ч. прокатку гладких тел и периодических профилей, т.е. тел вращения с различными (по длине изделия) диаметрами;

прокатку полых тел вращения, т.е. труб, включающую в себя: прошивку гильз, раскатку гильз в трубы, редуцирование труб и их калибровку; получение труб из гильз с помощью раскатной справки возможно как гладких, т.е. с неизменным по длине изделия диаметром (наружным и внутренним), так и труб периодического сечения, т.е. с изменяющимся по длине изделия диаметром как наружным, так и внутренним.

Линия стана ПВП 20-60 промышленного назначения (рис. 12) имеет в своем составе: нагревательное устройство 1, рольганг приемный 2, выбрасыватель 3 (4 шт.), упор качающийся 4 (2 шт.), зацентровщик 5 (1 шт.), упор 6 (1 шт.), стол приемный 7 (1 шт.), клеть рабочая универсальная 8 (1 шт.), клеть шестеренная 9 (1 шт.), центрователь 10 (1 шт.), упорно-регулирующий механизм 11 (1 шт.), выдающие ролики 13 (1 шт.), рольганг для передвижения гильз 14 (1 шт.), загрузочная решетка 15 (2 шт.), карман для готовых труб 16 (1 шт.), дисковая пила 18 (1 шт.).

Нагревательное устройство 1 представляет собой высокочастотный электромагнитный индуктор с термостатом для выравнивания температуры по всему сечению заготовки. В индукторе могут нагреваться как цилиндрические прутки под прошивку длиной 800 мм, так и уже прошитые гильзы длиной 1800-2000 мм. Производительность индукционного нагревательного устройства обеспечивает нагрев и изготовление труб до 80 шт./час.

Загрузочная наклонная решетка 15 предназначена для приема заготовки, поступающей от нагревательного устройства 1, передачи заготовки к зацентровщику 10, и после выбивки центровательного отверстия на ней, передачи заготовки на передний приемный стол 7 рабочей универсальной

клетки 8. Загрузочная наклонная решетка включает в себя: приемный рольганг 2, выбрасыватель 3, качающий упор 4, рольганг перед зацентровщиком 5, выбрасыватель 3, упор перед желобом 6, наклонные балки.

Приемный рольганг и рольганг перед зацентровщиком имеют одинаковую конструкцию, состоящую из контрольных роликов, опирающихся на сферические подшипники, установленные в вертикальных стойках. Ролики имеют групповой привод, включающий цилиндрический редуктор, электродвигатель и цепную передачу, объединяющую группу роликов, размещенную на опорной плите. Шаг роликов – 250 мм, диаметр роликов – 100 мм, скорость транспортировки – 1,2 м/сек.

Выбрасыватели заготовки 3 предназначены для поштучной передачи заготовок с роликов рольганга на наклонные решетки 15. Каждый выбрасыватель имеет ряд сдвоенных фигурных рычагов, укрепленных на общем валу, который поворачивается от электропривода, состоящего из редуктора и электродвигателя, установленных на единой фундаментной плите.

Качающиеся упоры 4 предназначены для выравнивания и удержания заготовок на наклонной решетке перед зацентровщиком и передним столом стана.

Упоры обеспечивают четкую работу при автоматическом режиме прокатки. Упор имеет ряд литых стальных рычагов, закрепленных на общем валу, опирающимися через подшипники на стойки. Поворот вала с рычагами осуществляется от пневмопривода.

Наклонная решетка выполнена из рельсов. Угол наклона – 12-13°. Рельсы крепятся на стойках при помощи прижимов и болтов (рис. 13).

Зацентровщик пневматический 5 предназначен для выбивки центрального углубления на торце нагретой заготовки перед задачей ее в рабочую клетку и представляет собой длинный пневмоцилиндр, в котором

и М (10)

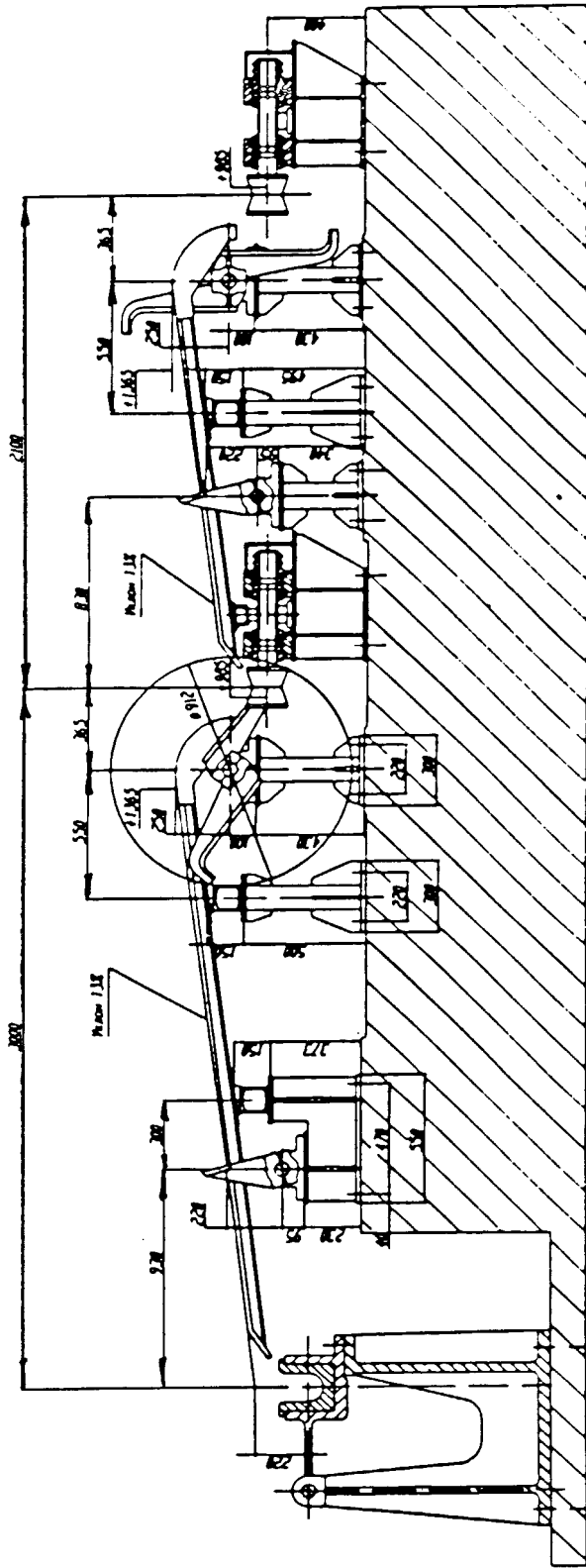


Рис. 13 Конструкция наклонной решётки

скользит ударник. Ударник под действием сжатого воздуха, перемещаясь по пневмоцилиндру, заостренным концом выбивает в торце заготовки центровое отверстие.

Привод стана состоит из шестеренной клетки, универсальных шпинделей и электродвигателя.

Шестеренная клетка 9 конструкции ЭЗТМ объединена в стальном корпусе с редуктором и имеет три выводных тихоходных вала, соединяющихся через универсальные шпиндели, с рабочими валками и один быстроходный выводной вал, соединяющийся через зубчатую муфту с электродвигателем.

Три тихоходные шестерни входят в зацепление с центральной шестерней, посаженной на полом вала, и расположены на равном расстоянии друг от друга. Корпус шестеренной клетки имеет один разъем.

Передний стол 7 стана предназначен для приема заготовки, скатывающейся в желоб по наклонной решетке, и представляет из себя литой желоб, закрепленный на оси к опорной стойке. Регулировка желоба по высоте на разный диаметр заготовок осуществляется винтами.

Рабочая клетка стана 8 включает в себя основание станины, которая закрывается крышкой. Барабаны-кассеты, выполненные в виде гидроцилиндров с закрепленными в них рабочими валками, устанавливаются в гнездах станины под углами 120° друг относительно друга при трехвалковой схеме прокатки (прошивки) и под 180° - при двухвалковой схеме. При необходимости сведения или разведения рабочих валков жидкость из гидросистемы под давлением через одно из отверстий в штоке поступает в рабочую полость гидроцилиндра, перемещая его вместе с закрепленным на нем рабочим валком.

При изготовлении гладких изделий в обеих полостях гидроцилиндров устанавливается статическое равновесие, т.е. рабочие валки настроены на постоянный размер. Для осуществления разворота рабочих валков на необходимый угол подачи барабаны-кассеты (гидроцилиндры) помещены в цилиндрические стаканы. Вращением стакана вокруг своей оси с помощью винтов через цилиндрическую шпонку осуществляется разворот рабочих валков на необходимый угол подачи.

Выходная сторона прокатного стана ПВП 20-60 предназначена для удержания и центрирования стержня прошивной оправки, приема и транспортирования прошитой гильзы и состоит из двух центрователей с двумя парами выдающих роликов 10 и упорно-регулирующего механизма 11. Ролики каждого центрователя смонтированы в станине и при помощи рычажной системы от пневмопривода могут зажимать различные положения относительно оси прокатки для центровки стержня прошивной оправки. На рис. 14 показана конструкция центрователя для центровки стержня оправки. На рис. 15 показаны три положения роликов центрователя:

а – при центровании стержня прошивной оправки;

б – положение роликов при центровании гильзы совместно со стержнем прошивной оправки;

в – центрирующие ролики разведены в крайнее положение для обеспечения свободной выдачи (сползания) гильзы со стержня прошивной оправки.

Упорно-регулирующий механизм 11 предназначен для удержания стержня прошивной оправки во время выдачи гильзы, регулирования положения прошивной оправки в очаге деформации и подведения охлаждающей жидкости через стержень к оправке.

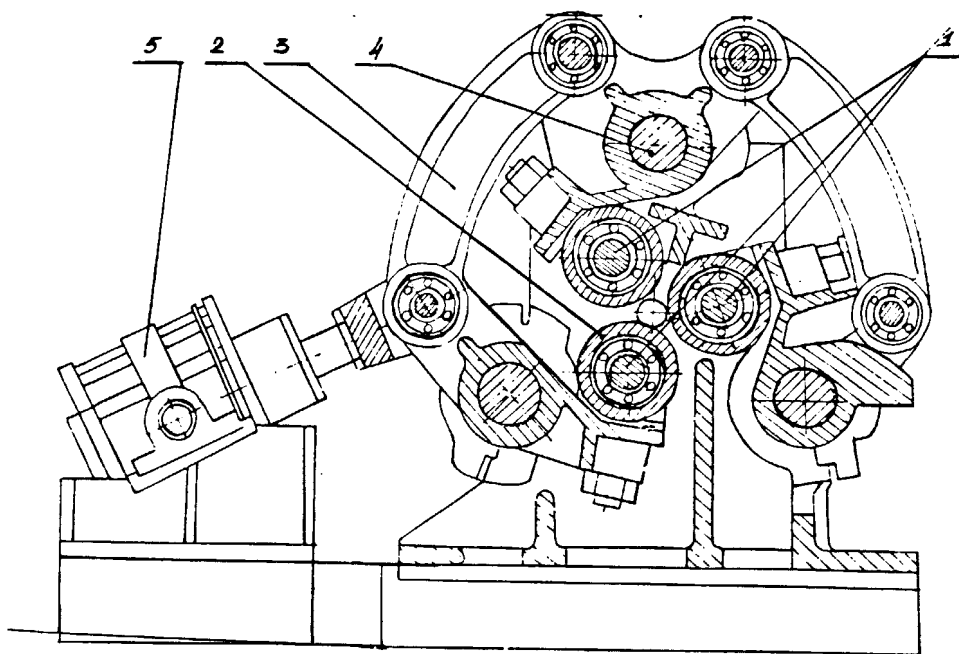


Рис. 14 Конструкция центрователя для центровки стержня оправки

1 – Оси центрирующих роликов, 2 – ролики центрирующие, 3 – тяги, 4 – оси вращения рычагов роликов, 5 – пневмопривод.

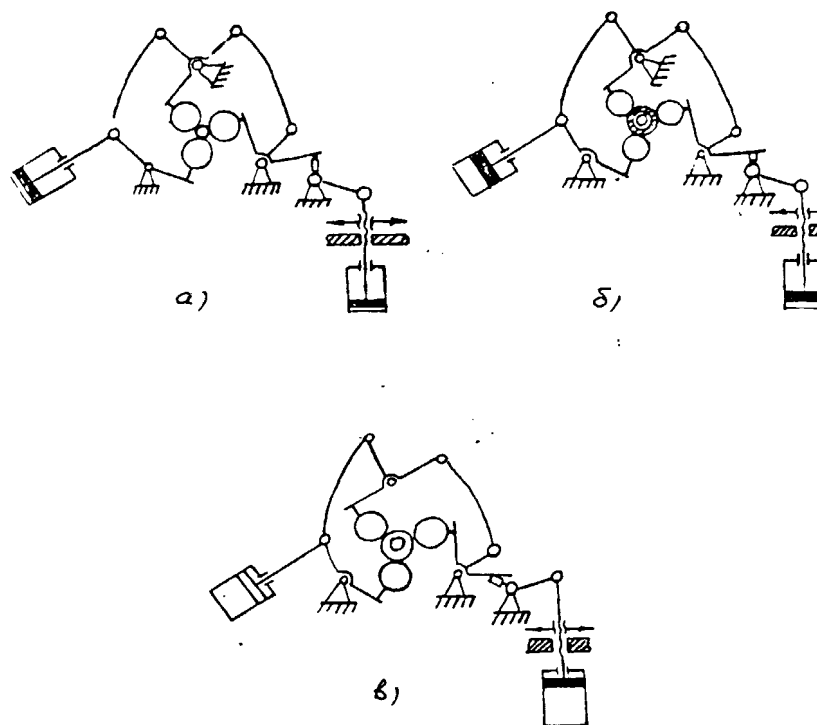


Рис. 15 Схема положений центрирующих роликов

Упорно-регулирующий механизм состоит из следующих узлов:

упорной головки с вращающимся шпинделем, обеспечивающим вращение стержня оправки во время прокатки;

пневматического привода, обеспечивающего подъем головки для пропуска гильзы и опускания головки в исходное положение;

механизма запора, фиксирующего головку в исходном положении;

механизма передвижения для регулирования оправки в очаге деформации;

трех холостых роликов, обеспечивающих поддержку гильзы во время ее выдачи с выходной стороны.

Механизм перемещения стержня раскатной оправки 13 предназначен для восприятия осевых нагрузок, возникающих в процессе раскатки на оправке, зарядки стержня раскатной оправки через гильзу, отвода стержня оправки от рабочей клетки и изменения положения оправки в очаге деформации в процессе раскатки гильзы в трубу.

Механизм устанавливается на раму и крепится к ней болтами. Он состоит из станины, выполненной из стального литья, узла каретки, верхнего и нижнего роликов, механизма сведения и разведения их (роликов) от пневмоцилиндра через систему рычагов.

Каретка устанавливается в направляющих станины, по которым она перемещается вдоль оси прокатки при необходимости изменения положения раскатной оправки в очаге деформации в процессе раскатки или для извлечения раскатной оправки при ее закатывании ее в гильзе. Перемещение каретки осуществляется от гидроцилиндров.

Для восприятия осевых нагрузок вращающегося стержня раскатной оправки в каретку вмонтирован подшипниковый узел. Вращение роликов,

установленных на каретке и предназначенных для перемещения стержня с раскатной оправкой, осуществляется через карданные валы от двух электродвигателей. Сведение и разведение роликов каретки осуществляется через пневмоцилиндр.

Ролики выдающие 12 предназначены для приема гильзы, центрирования и подачи ее в рабочую клеть. Ролики крепятся консольно. Одновременно сведение и разведение выдающих роликов осуществляется так же, как и у роликов каретки раскатной оправки, т.е. от пневмоцилиндров. Вращения выдающих роликов осуществляется через карданные валы от электродвигателей.

Механизм перемещения стержня раскатной оправки и два механизма выдающих роликов находятся перед шестеренной клетью.

За упорно-регулирующим механизмом 11 установлен рольганг 17, служащий для транспортировки полученной трубы к дисковой пиле 18 и представляющий собой ряд консольных роликов.

Дисковая пила 18 служит для обрезки разорванного (деформированного) конце трубы (гильзы). Ход реза пилы обеспечивается гидроцилиндром, вращение диска пилы осуществляется от электродвигателя через ременную передачу. От рольганга отходит приемная решетка, которая оканчивается приемным карманом 18 для готовых труб.

2.3. Краткое описание технологического процесса

Применение в стане поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 универсальной рабочей клетки вышеописанной конструкции позволяет получать изделия сплошные, полые гладкие и изделия периодического про-

филя. Стан ПВП 20-60 может работать, поочередно применяя двух-, трех и четырехвалковую схемы прокатки в следующих режимах:

в режиме прошивки сплошных тел вращения в гильзы;

в режиме раскатки прошитых гильзы в трубы;

в режиме изготовления изделий периодического профиля с изменением диаметра изделия по длине изделия в том числе:

а) с изменением наружного диаметра изделия (как сплошных изделий, так и полых) по его длине;

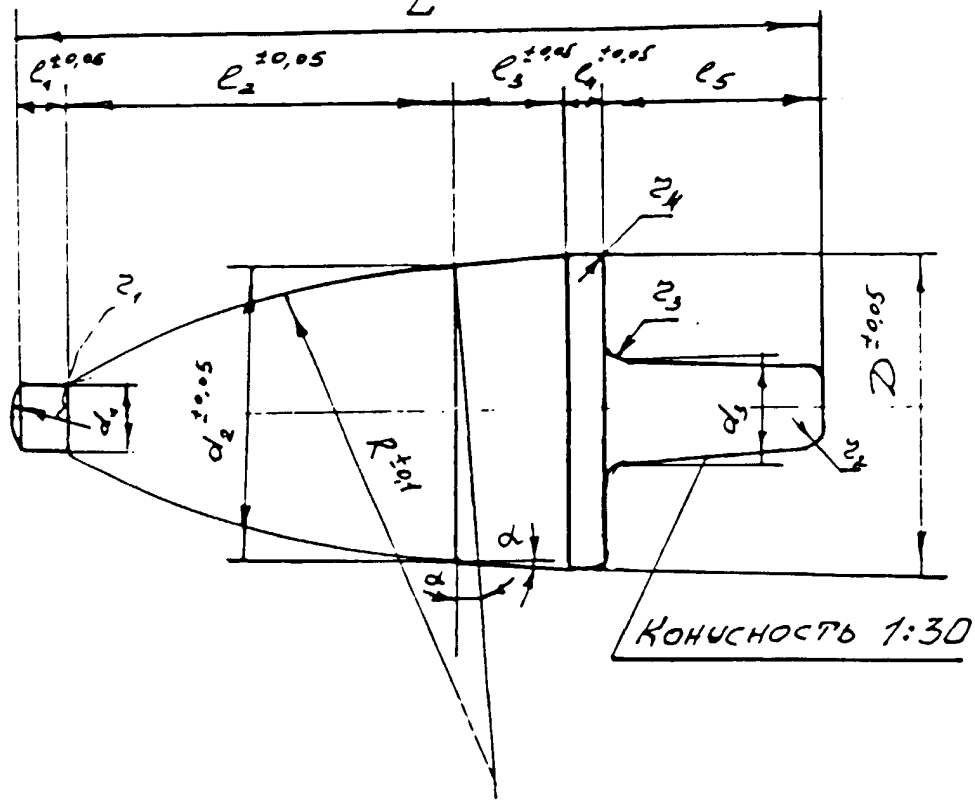
б) с изменением внутреннего диаметра по длине труб;

в режиме редуцирования или калибровки.

2.3.1. Работа стана ПВП 20-60 в режиме прошивки

Как указывалось выше, данный стан с применением универсальной рабочей клетки предлагаемых конструкций может поочередно, в зависимости от конкретных условий (сортамент труб, их назначения, требования к качеству наружной и внутренней поверхности, материала заготовки, его деформационно-прочностных свойств и т.п.), работать по двух- или трехвалковой схемам прошивки. Переналадка с одной схемы на другую несложна и время, требуемое на ее осуществление незначительно, равно примерно времени перевалки рабочих валков.

Процесс прошивки начинается с подачи связки цилиндрических сплошных заготовок длиной 800 мм краном на стеллаж перед нагревательным устройством 1. После этого заготовки поштучно задаются в камеру индукционного нагревательного устройства, откуда в нагретом виде толкателем выталкиваются на рольганг 2 до упора 4. С рольганга 2 заготовка подается через наклонную решетку на рольганг зацентровщика 5, с помощью



D	d ₁	d ₂	d ₃	L	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	z ₁	z ₂	z ₃	z ₄	R	α
28	10	26,2	12	101	8	45	15	5	28	10	3	1,5	1,5	155,2	3°30'
30	10	28,2	12	101	8	45	15	5	28	10	3	1,5	1,5	163,5	3°30'
31	10	29,2	12	101	8	45	15	5	28	10	3	1,5	1,5	150	3°30'
32	10	30,2	12	101	8	45	15	5	28	10	3	1,5	1,5	145,1	3°30'
34	10	32,2	12	106	8	50	15	5	28	10	3	1,5	1,5	163,3	3°30'
36	10	34,2	12	106	8	50	15	5	28	10	3	1,5	1,5	146,5	3°30'
41	10	39,2	12	111	8	55	15	5	28	10	3	1,5	1,5	144,3	3°30'
44	10	42,2	12	116	8	60	15	5	28	10	3	1,5	1,5	155,5	3°30'
46	10	44,2	15	116	8	60	15	5	28	10	3	1,5	1,5	146	3°30'

Рис. 16 Тип и размеры прошивной оправки, используемых на универсальном стане ПВЛ20-60

которого на торце заготовки выбивается центровочное отверстие. От зацентровщика 5 заготовка поступает по наклонному стеллажу на приемный стол 7 прокатного стана и далее в раствор рабочих валков универсальной рабочей клетки 8, настроенной на одну из выбранных схем прошивки.

Одновременно с транспортировкой (подачей) нагретой заготовки к рабочей клетки в очаг деформации устанавливается прошивная оправка, закрепленная в упорно-регулирующем механизме 11 и центрируемая роликами двух центрователей 10.

В процессе прошивки полученная гильза проходит через ролики центрователей (рис. 16), упорно-регулирующий механизм, упорная головка которого в момент прохождения гильзы поднята пневмоцилиндром вверх к прижиму дисковой пилы 18, после чего гильзы по стеллажу поступают в карман 16. При прошивке используются прошивные оправки, в основном конструкции ЦНИИЧЕРМЕТа с размерами, показанной на рис. 16.

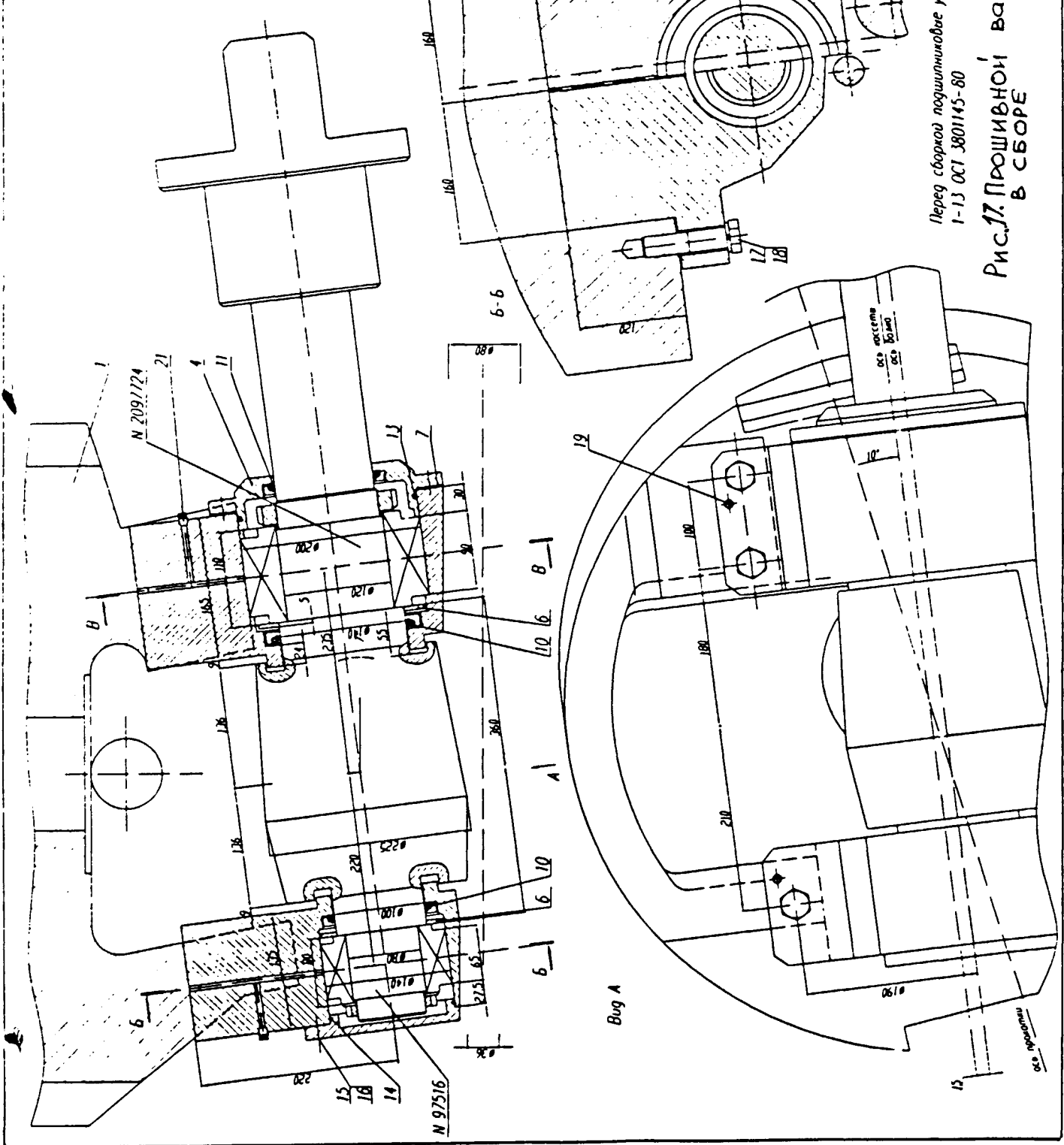
Конструкция прошивных валков в сборе показана на чертеже (рис. 17).

2.3.2. Работа универсального стана ПВП 20-60 в режиме раскатки

Перед началом раскатки необходимо сменить прошивные валки (рис. 18а) на раскатные (рис. 18б), а также извлечь прошивную оправку из упорно-регулирующего механизма. Прошитые заготовки (гильзы) поштучно нагреваются в том же индукционном нагревательном устройстве 1, после чего поступают на приемный рольганг, которым нагретая гильза транспортируется до конечного второго упора 19. Далее с помощью выбрасывателя гильза поступает на наклонную решетку 15 и скатывается на разведенные выдающие ролики 12.

В этот момент включается тележка раскатной оправки 13, которая подает раскатную оправку внутрь гильзы, которые вместе и одновременно поступают через полый вал шестеренной клетки 8. Стержень раскатной оп-

Генеральный артикул	Величина
Грубомер	мм
Диаметр вала	225
Угол раскатки	7
Смещение тангенциальное	15
Угол подреза	8-12
Нагрузка на подшипники	
диаметральная	43700
динамическая	52700
статическая	22800
диаметральная	25100
статическая	10000
Вращающий момент на валу	
Засосовый диаметр	80-130
Прутковый диаметр	36-85
Объем по диаметру на валу	50



Перед сборкой подшипниковые узлы заполнить смазкой жирообразной 1-13 ГОСТ 3801145-80

Рис. 17. ПРОШИВНОЙ ВАЛОК В СБОРЕ

Валок рабочий 175

равки при раскатке работает на растяжение, а сама оправка (ее рабочая часть), вращаясь вместе с гильзой находится неподвижно в очаге деформации относительно рабочих валков. При этом гильза раскатываемая в трубу сползает с раскатной оправки. Раскатанные трубы проходят через оба центрователя, с выдающими роликами 10 и упорно-регулирующий механизм 11, головка которого предварительно поднята вверх. Далее труба передается рольгангом до упора, выбрасывается на наклонный стеллаж и скатывается в карман готовых труб 16. Рабочие валки, применяемые при раскатке показаны на Рис. 18.

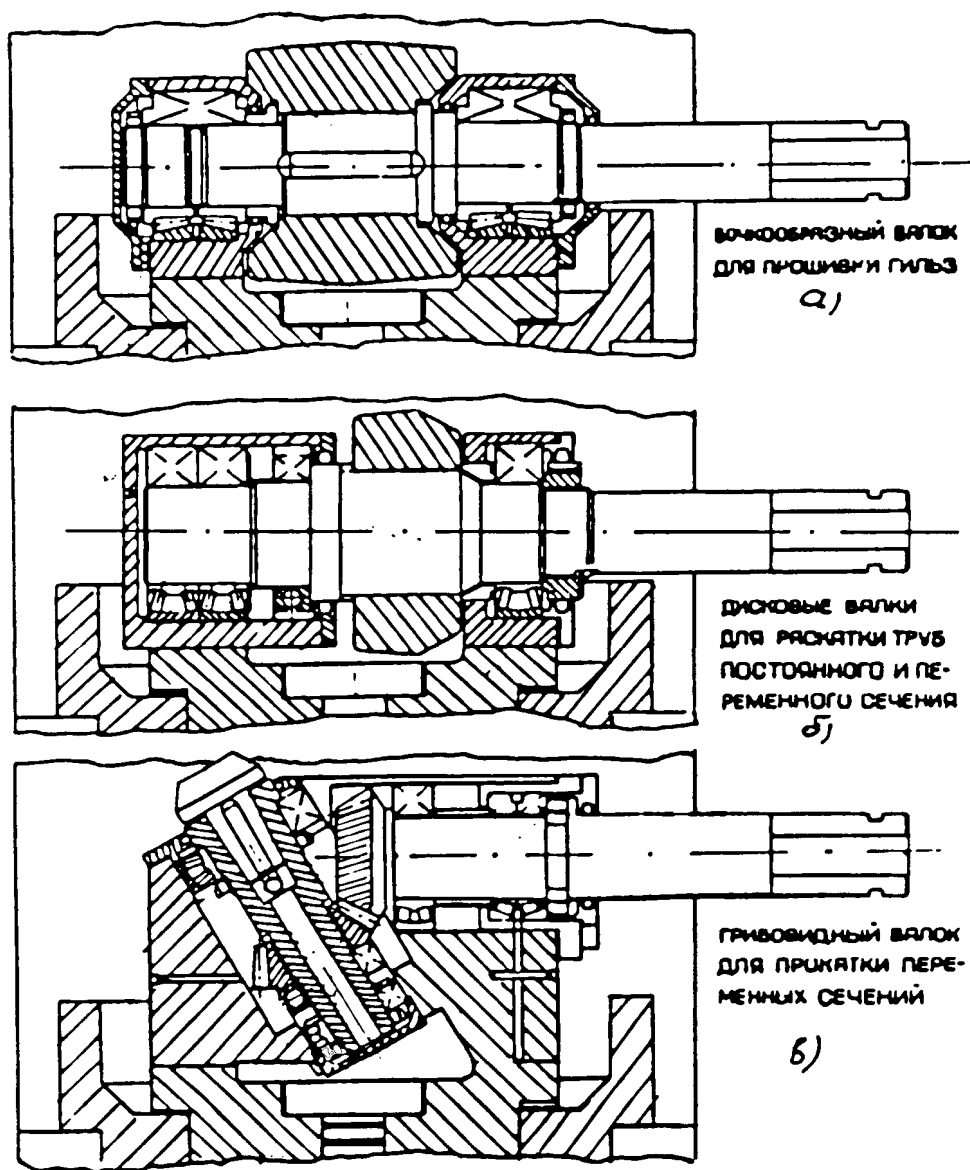


Рис. 18 Типы рабочих валков

При изготовлении гладких труб (или прутков) рабочие валки настроены на постоянный размер, т.е. сведение и разведение их отсутствует (копирный ролик следящей системы движется по гладкой копирной линейке).

2.3.3. Работа универсального стана ПВП 20-60 при прокатке изделий периодического профиля

Универсальный стан ПВП 20-60 может осуществлять прокатку изделий периодического профиля трех видов:

изделий с изменяющимся наружным диаметром по длине (сплошные и полые изделия);

полые изделия с изменяющимся по длине внутренним диаметром;

изделия с одновременно изменяющимся наружным и внутренним диаметром по длине изделия.

В этом случае применяется трехвалковая схема прокатки.

Рабочие валки, применяемые в данном режиме прокатки, могут быть как дисковыми, так и грибовидными (рис. 18в, 19).

Стержень прошивной оправки предварительно извлекается из упорно-регулирующего механизма, так как прошивная оправка в процессе прокатки изделий периодического профиля не участвует. Заготовкой для сплошных изделий периодического профиля служит цилиндрический пруток, нагретый в индукционном нагревательном устройстве.

Нагретая заготовка проходит к рабочей клетки тот же путь, что и заготовка перед прошивкой, исключается только выбивка центрального отверстия зацентровщиком.

В момент поступления заготовки в раствор рабочих валков включается следящая гидравлическая система, работа которой заключается в следую-

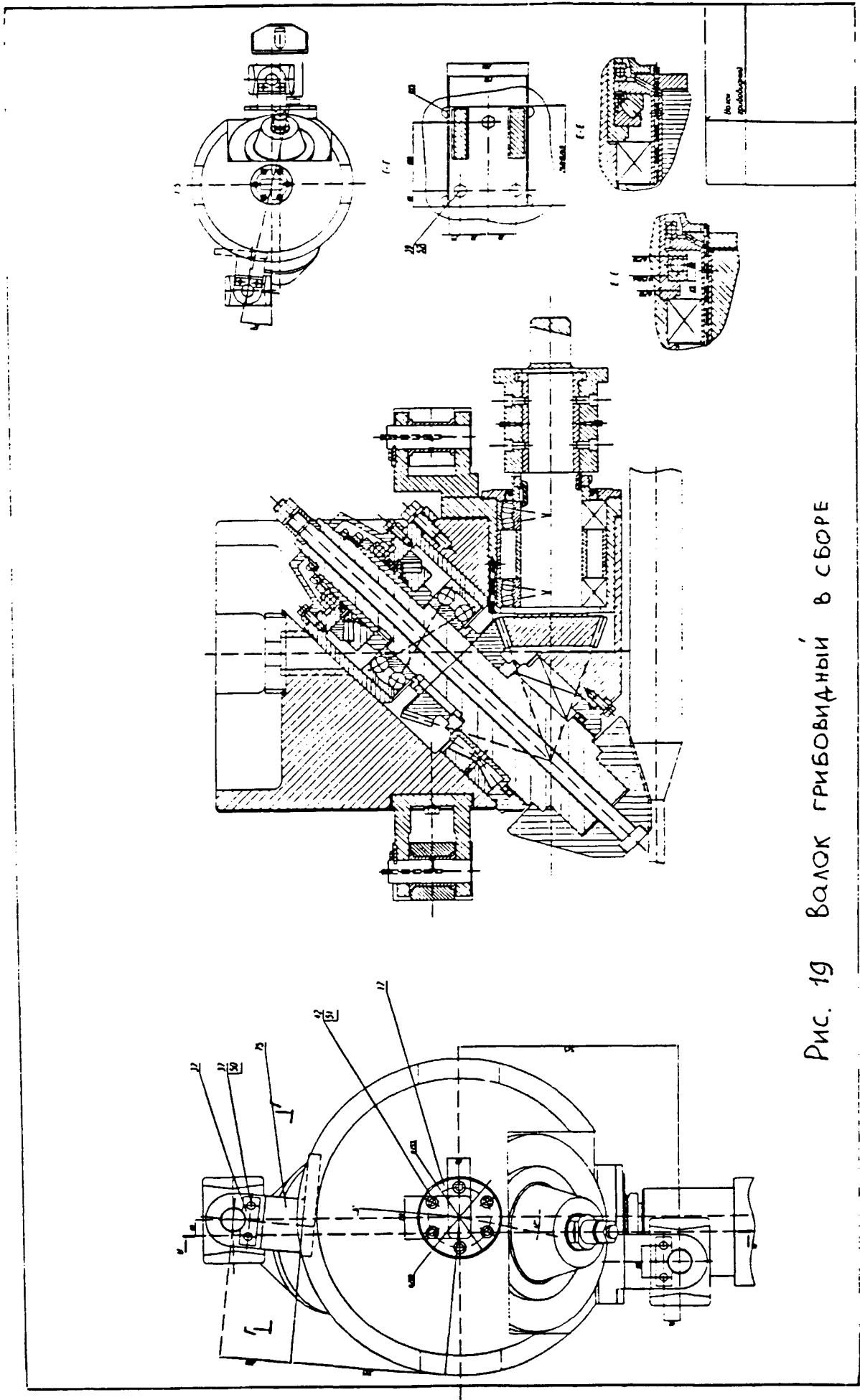


Рис. 19 Валок грибовидный в сборе

щем: копировальная линейка, повторяющая заданный профиль прокатываемого изделия, движется (одновременно с прокатываемым прутком) относительно неподвижного копирного ролика, корпус которого выполнен в виде гидроцилиндра, связанного с гидросистемой. Копирный ролик, попадая то во впадину линейки, то на ее выступ дает сигнал в гидросистему, рабочая жидкость которой через золотник-распределитель поступает в одну из двух рабочих полостей гидроцилиндра рабочих валков, заставляя последние (рабочие валки) сдвигаться или раздвигаться, повторяя на поверхности заготовки профиль копировальной линейки. Прокатанный пруток с периодическим профилем поступает к дисковой пиле, которая разрезает его на отдельные изделия.

При изготовлении труб переменного профиля, например, труб с внешними утолщениями (законцовками) – т.е. полое изделие с изменяющимся внешним диаметром, гильза, служащая заготовкой для труб подобного типа, повторяет путь гильзы, идущей на раскатку, т.е. поступает на выдающие ролики, стоящие перед шестеренной клетью и вместе со вставленной в нее (гильзу) раскатной оправкой подается в раствор дисковых или грибовидных валков, которые сдвигаясь и раздвигаясь по заданной программе (профиль копировальной линейки) образуют периодический профиль. При этом раскатная оправка в очаге деформации (относительно рабочих валков) остается неподвижной в осевом направлении.

При прокатке полых изделий периодического профиля с изменяющимся внутренним диаметром по длине, так же как и в предыдущем случае, применяется в качестве заготовки предварительно проштампанная гильза. При прокатке изделий периодического внутреннего профиля так же применяется раскатная оправка, конструкция которой отличается от обычной раскатной оправки. Раскатная оправка, позволяющая прокатывать трубы с различными внутренними диаметрами состоит из двух удлиненных рабочих частей, диаметр каждой

из них соответствует минимальному и максимальному внутреннему диаметрам прокатываемой трубы с внутренним периодическим профилем. В процессе формирования минимального внутреннего диаметра трубы в очаге деформации находится первая удлиненная рабочая часть раскатной оправки с минимальным диаметром. Рабочие валки в этом случае настроены на неизменность наружного диаметра трубы (рис. 20а).

После того, как произошло формирование необходимой части изделия с минимальным внутренним диаметром, происходит передвижение раскатной оправки в направлении движения прокатываемого изделия таким образом, чтобы в очаге деформации оказалась вторая рабочая часть раскатной оправки с наибольшим диаметром.

С этого момента непрерывающийся процесс прокатки начинает формировать длину изделия с максимальным внутренним диаметром (рис. 20б).

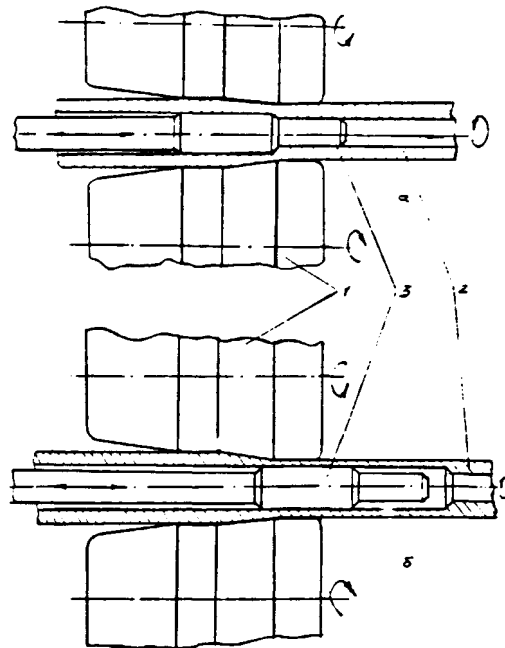


Рис. 20 Прокатка труб с внутренним периодическим профилем.
а – прокатка меньшего внутреннего диаметра, б - прокатка большего внутреннего диаметра.

1 - рабочие валки, 2 - труба, 3 – оправка с периодическим профилем.

2.4. Реализация технического проекта в рабочий при изготовлении на ЭЗТМ универсального стана ПВП 20-60 в металле

На этапе обсуждения о возможности создания в металле универсального стана ПВП 20-60, с использованием в качестве базового данного эскизно-технического проекта, выполненного соискателем, конструкторское бюро косовалковых станов ЭЗТМ, руководимого Тартаковским И.К. и Финагиным П.М., согласилось выполнить рабочий проект стана ПВП 20-60, а ЭЗТМ - изготовить его в металле. ВИЛС стал заказчиком и финансирующей организацией. При общем понимании и согласии сторон о необходимости создания впервые в стране и за рубежом универсального стана с рабочей клетью, дающей возможность поочередно совмещать различные схемы прокатки (двух-, трехвалковые) и позволяющей выполнять на одной и той же клетки различные операции (прокатка прутка, прошивка гильз, раскатка труб, изготовление изделий периодического профиля и т.п.) с возможным приложением в процессе прокатки дополнительных внешних усилий подпора и натяжения, появилась необходимость в силу ряда аргументов и доводов при рабочем проектировании внести некоторые изменения в конструкцию линии стана при неизменности реализации идеи его универсальности.

Так, основным и принципиальным отличием от эскизно-технического проекта является то, что универсальный стан ПВП 20-60 на этапе рабочего проекта было решено изготовить не промышленного назначения, а опытно-экспериментальным.

Причинами для этого решения явились следующие обстоятельства:

стан подобного типа (по степени универсальности) изготавливается впервые и ряд узлов, механизмов и универсальную рабочую клеть, в первую очередь, необходимо предварительно опробовать на работоспособность, надежность и пр. сначала в условиях экспериментальных;

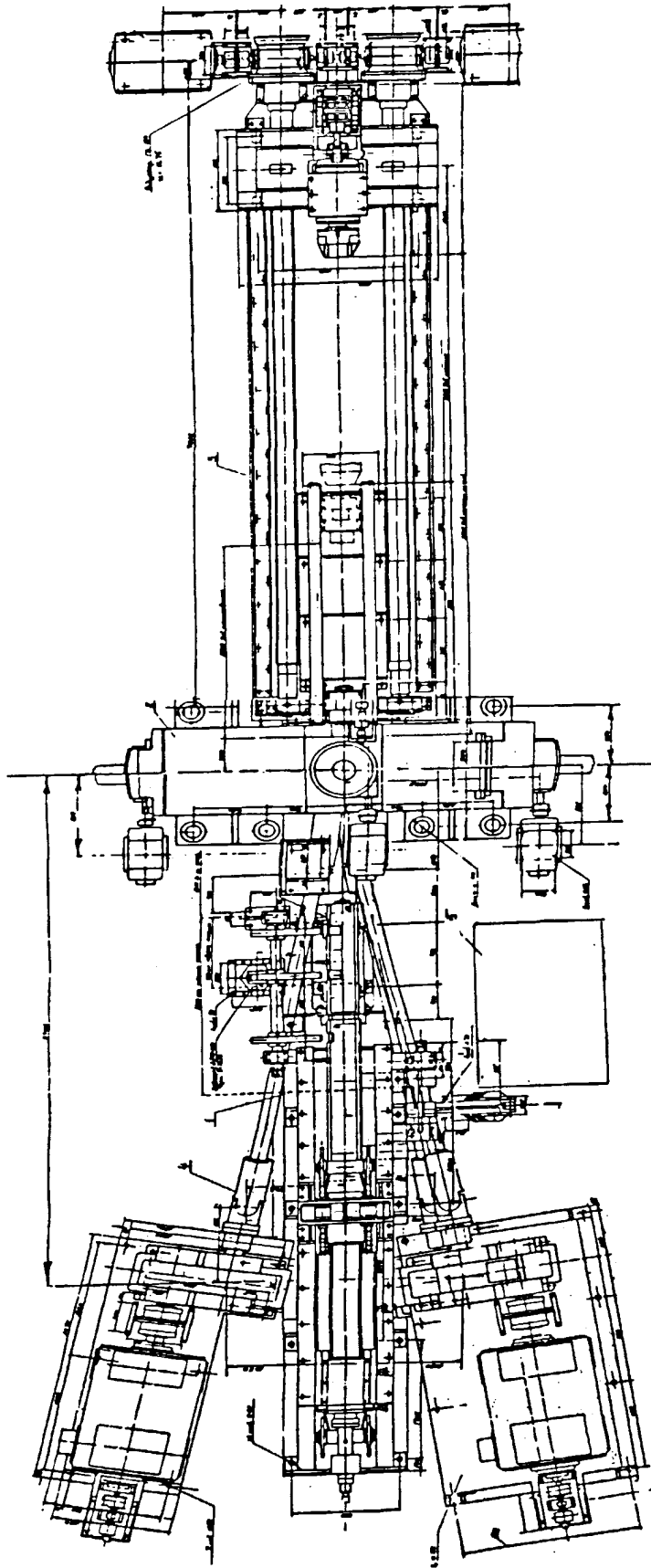


Рис. 24 Стан поперечно-нитовой прокатки ИВН 20-60. Общий вид (Рабочий проект).
 1 – входная сторона, 2 – клеть рабочая универсальная, 3 – выходная сторона, 4 – привод главный, 5 – гидросистема.

заказчик - ВИЛС, является по своему роду деятельности научно-исследовательским институтом и исполнение изготавливаемого оборудования должно соответствовать именно этому направлению деятельности, т.к. данный стан в указанном варианте необходимо было исследовать и изучать в полном объеме его возможностей;

отсутствие необходимых производственных площадей требуемых для стана в промышленном исполнении, т.к. в опытно-экспериментальном варианте стан ПВП 20-60 занимает в несколько раз меньше площадей.

Внесение изменений при изготовлении стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 в металле не изменило сути его универсальности, так как в основе его заложено изготовление универсальной рабочей клетки с учетом реализации идеи возможности поочередной прокатки при различных ее схемах наладки на двух- или трехвалковую).

На рис. 21 показан общий вид универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60, реально изготовленный в металле, в опытно-экспериментальном исполнении, который имеет: входную сторону 1, универсальную рабочую клетку 2, выходную сторону 3, главный привод 4, гидросистему 5.

Входная сторона стана (рис. 22 и рис. 23) состоит из загрузочного устройства 1, задающего устройства 2, подъемного ролика 3, подъемного желоба 4, проводки 5 и станины 6.

Загрузочное устройство предназначено для приема заготовки и укладки ее в желоб. Оно представляет собой систему рычагов 7, посаженных на общий вал 8, смонтированный в опорах 9 на подшипниках скольжения. Привод 10 загрузочного устройства [20] предназначено для задачи заготовки в раствор рабочих валков рабочей клетки. Это устройство состоит из гидроцилиндра 11, шток которого закреплен неподвижно на станине. Корпус гидроцилиндра 11 размещен в ползуне 12, который перемещается в направляющих станины 6. На ползуне 12 смонтированы два замкнутых через каретку 13 цепных контура 14, имеющих жесткую связь со станией 6.

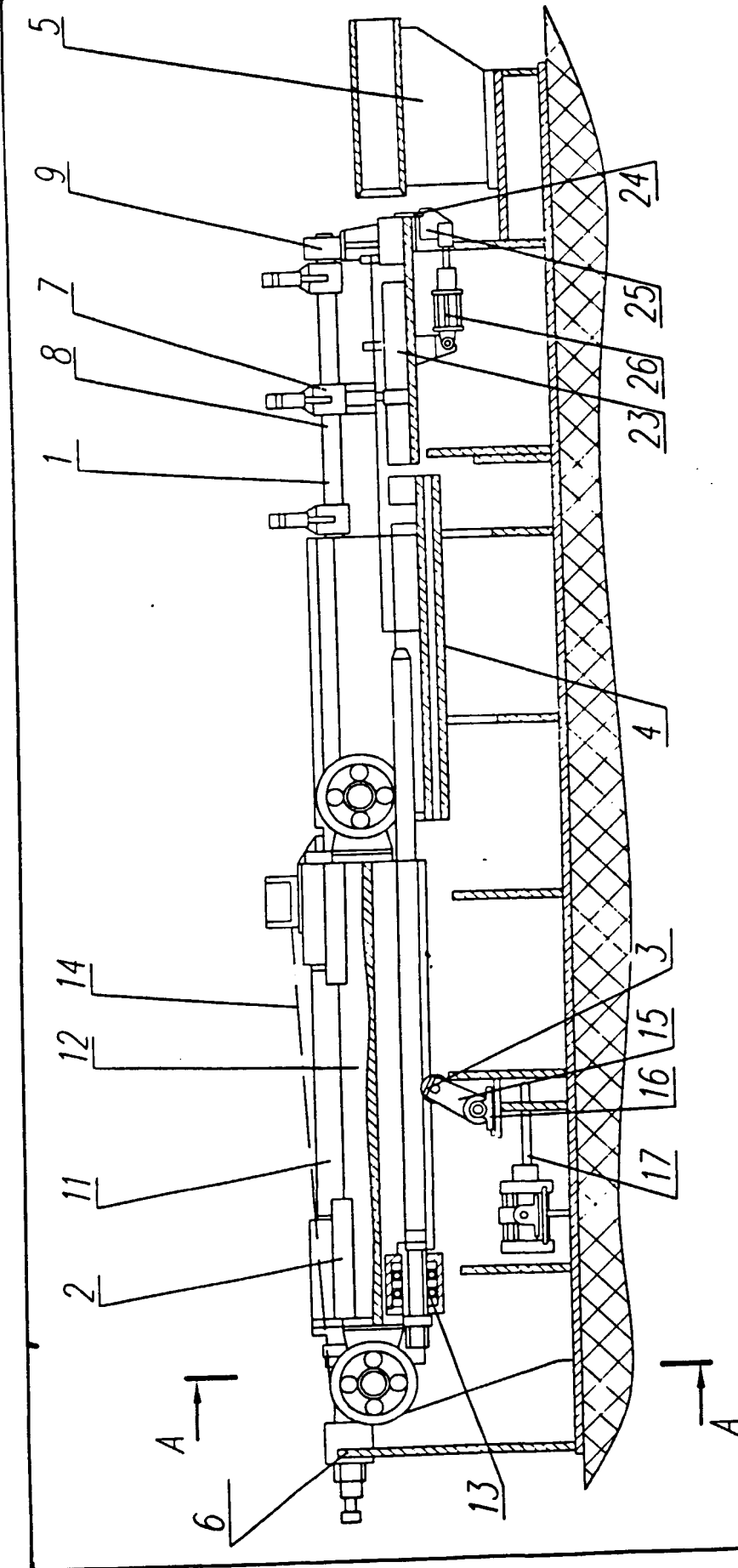


Рис.22 Входная сторона универсального стана 18Л20-60

A-A (рис 22)

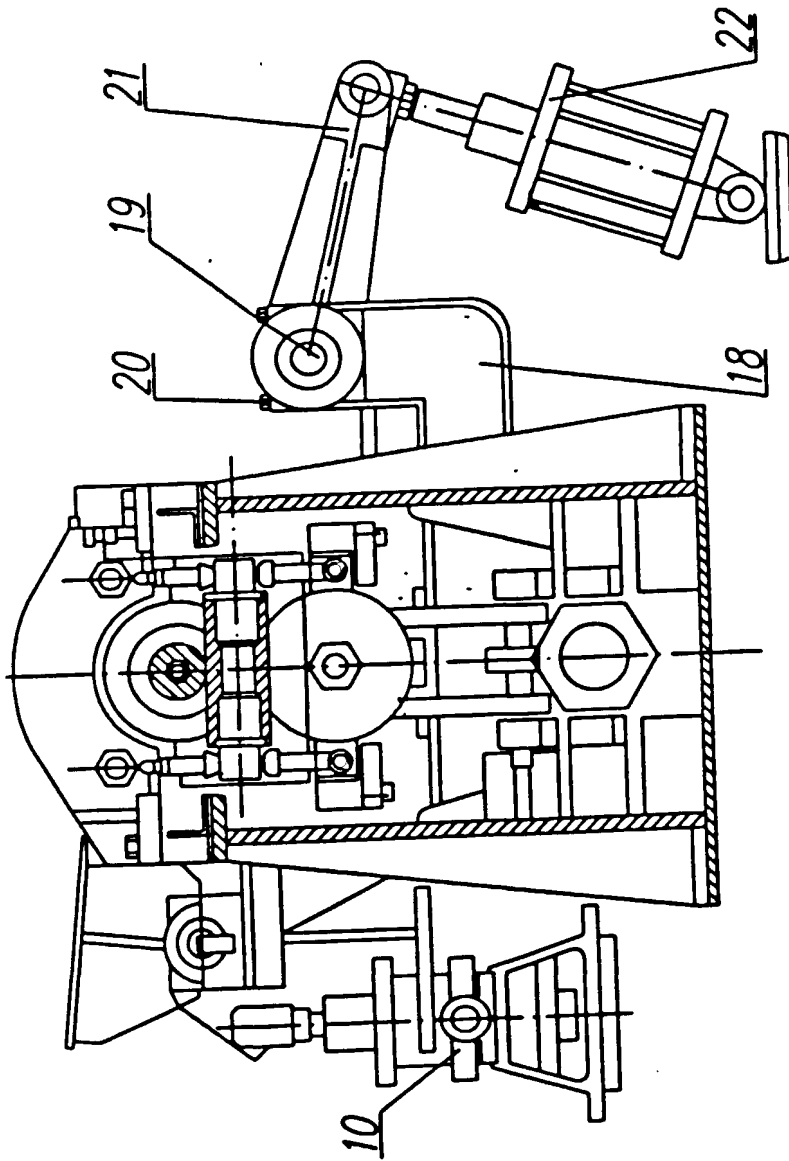


Рис. 23 Входная сторона

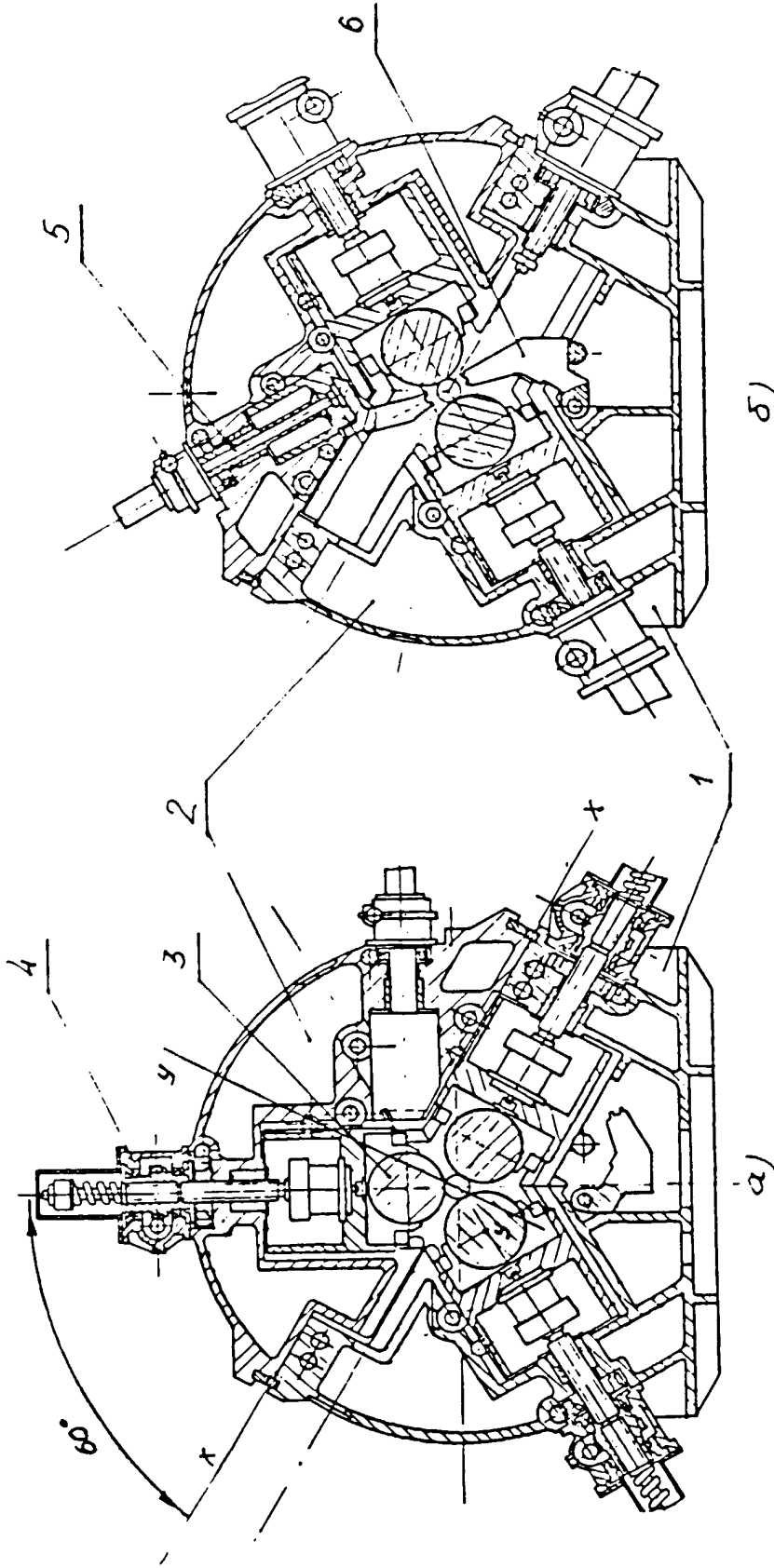
На каретке 13 во вращающейся втулке крепится толкатель или стержень, удерживающий оправку. Подъемный ролик служит для поддержания раскатной оправки при задаче ее в полную заготовку. Он состоит из сварного корпуса 15, смонтированного в опорах 16 на подшипниках скольжения. Подъем и опускание ролика осуществляется пневмоцилиндром 17. Желоб 4, из подъемной и неподвижной частей служит для приема нагретой заготовки и совмещения оси заготовки и осью прокатки.

Подъемный желоб 4 установлен на двух рычагах 18, посаженных на общий вал 19, смонтированный в опорах 20 на подшипниках скольжения. Верхнее положение желоба регулируется винтом и зависит от диаметра прокатываемой заготовки. Опускание желоба для прохождения каретки осуществляется через рычаг 21 пневмоприводом 22. Регулировка по высоте стационарного желоба 23 осуществляется прокладками. На стационарном желобе смонтирован опускающийся шибер 24, который служит для удержания полой заготовки при задаче в нее раскатной оправки. Опускание шибера осуществляется пневмоцилиндром 26.

Проводка 5 служит для направления и удержания заготовки на оси прокатки при задаче ее в раствор рабочих валков является сменным инструментом и меняется в зависимости от диаметра заготовки.

Рабочая клеть.

При изготовлении стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 и его главного узла - рабочей клетки была реализована та же идея - возможности совмещения поочередных схем прокатки (прошивки): двух- и трехвалковой с некоторыми конструктивными отличиями от ранее описанных (варианты I и II). На рис. 24 изображена универсальная рабочая клеть стана поперечно-винтовой прокатки ПВВ 20-60 - (вариант III) [21], включающий в себя: корпус станины 1, крышку 2, рабочие валки 3, закрепленные с гидроподушками, представляющие собой гидроцилиндры, механизм установки и передвижения рабочих валков с индивидуальными приводами 4, механизм установки верхней линейки, нижнюю линейку 6.



а - Трехвалковая схема сборки

б - Двухвалковая схема сборки

Рис. 24 Рабочая клетка стана поперечно-зигитовой прокатки ПЭИ 20 - 60.

Разъем рабочей клетки осуществляется между крышкой рабочей клетки и корпусом станины по линии X-X в крышке рабочей клетки имеется два гнезда, в одно из которых вертикально устанавливается вертикально один из трех рабочих валков вместе с гидроподушкой. Второе гнездо - выполнено под углом 90 градусов по отношению к оси вертикально установленного рабочего валка - и предназначено для установки в него механизма верхней линейки при переналадке на двухвалковую прокатку.

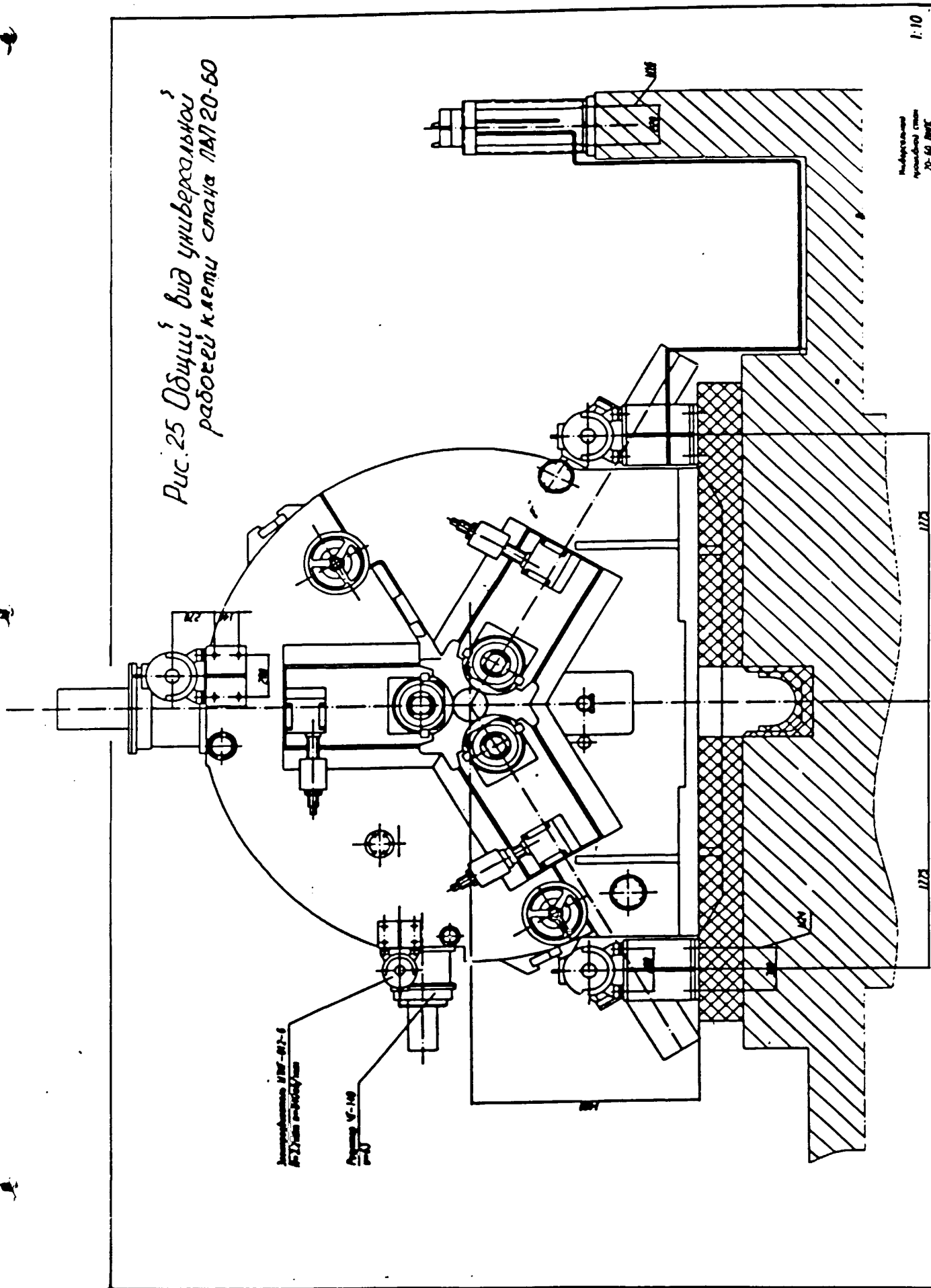
Рабочая клеть, настроенная на трехвалковую схему работы показана на рис.24а. Линия (плоскость) разъема крышки и корпуса станины X-X осуществлена наклонно под углом 60 градусов к оси вертикально установленного рабочего валка и параллельно оси одного из гнезд, находящегося в корпусе станины.

Для переналадки из трехвалковой схемы работы стана в двухвалковую (рис. 24б) необходимо:

приподнять крышку рабочей клетки 2, извлечь из гнезда станины правый рабочий валок с барабаном (гидроцилиндром) и, повернув крышку на 180 градусов вокруг оси У-У, установить ее на свое место. При этом, ось барабана с рабочим валком, находящегося вертикально (при трехвалковой схеме) в крышке, после поворота крышки У-У на 180 градусов совпадет с осью левого барабана с рабочим валком, находящегося в корпусе станины и рабочая клеть, после установки механизма верхней линейки 5 и нижней линейки 6, настроена на двухвалковую схему работы.

Конструкция универсальной рабочей клетки данного варианта (III) проста в эксплуатации, а время на переналадку из трехвалковой схемы прокатки в двухвалковую или наоборот, крайне невелико и близко к времени на перевалку рабочих валков. При переходе с трехвалковой схемы прокатки на двухвалковую направление вращения электродвигателей и двух рабочих валков должны быть противоположными.

Рис. 25 Общий вид универсальной
рабочей клетки станка ПМТ 20-60

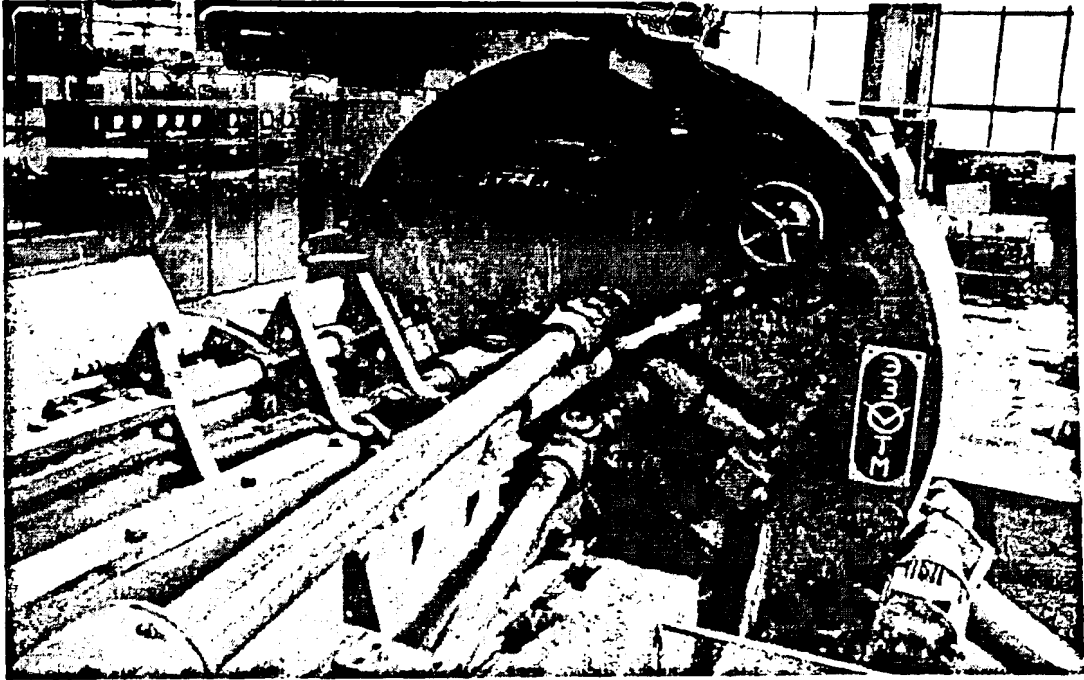


Универсальная
рабочая клетка
ПМТ 20-60

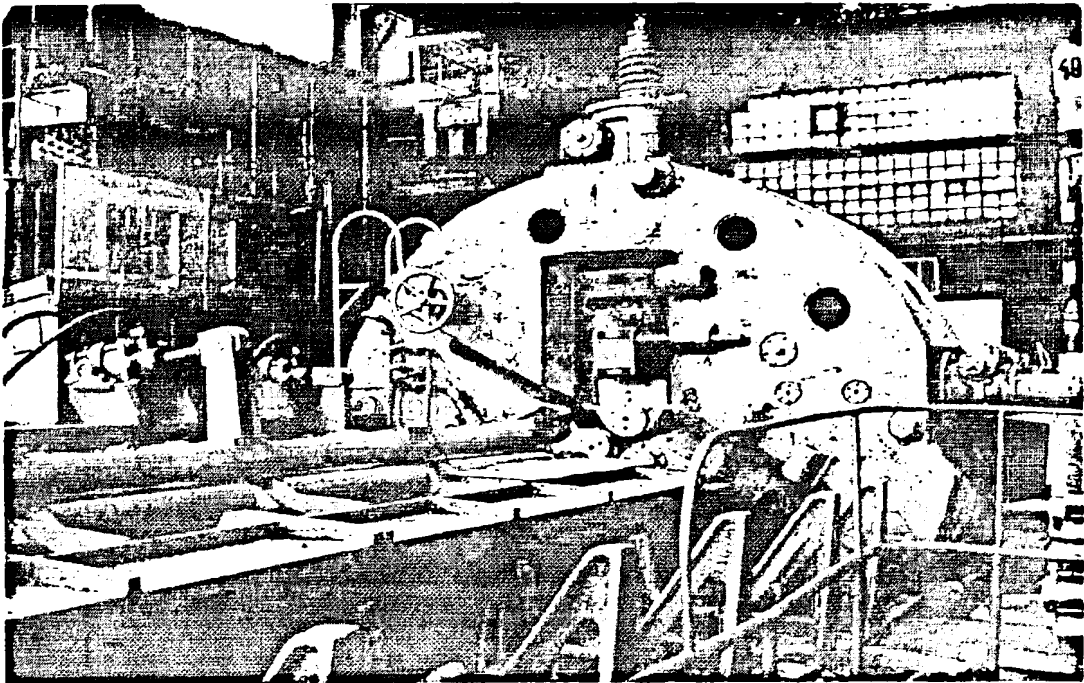
1:10

Инструмент ИИВ-01-6
для шлифования

Резец В-10



а)



б)

Рис. 26. Общий вид стана ПВП 20-60.
а – входная сторона стана; б – выходная сторона стана.

Сторона выходная стана ПВП 20-60 (рис. 27) предназначена для приема прокатанных изделий, а так же для удержания стержня прошивной оправки при прошивке, для создания натяжения при прокатке изделий периодического профиля (ступенчатых) или раскатке с натяжением на удерживаемой оправке. (Сторона выходная состоит из рамы 1 сварной конструкции, по направляющим которой перемещается каретка 2 с упорно-тянущим патроном 3. Перемещения каретки осуществляется от электромеханического привода 4, состоящего из двух электродвигателей постоянного тока, двух червячных редукторов и винтовой передачи. Ближе к рабочей клетки на раме установлен подъемный ролик 5 для поддержания изделия при прокатке. Здесь же предусмотрены площадки, на которых устанавливаются либо центрователь 6 стержня (при прошивке или раскатке на короткой оправке), либо проводка (при раскатке труб на удерживаемой оправке).

Упорно-тянущий патрон 3 состоит из корпуса 7, в котором смонтированы на подшипниках качения головка 8 с тремя зажимными губками 9. Сведение и разведение губок осуществляется от пневмоцилиндра 10 через систему рычагов 11 и полый шпиндель 12. В шпинделе предусмотрена установка стакана 13 с конической расточкой, в которую входит конусная часть стержня прошивной оправки при прошивке. Два упорных сферических подшипника 14 обеспечивают восприятие осевой нагрузки на стержень при прокатке на короткой оправке или усилия натяжения при раскатке труб с натяжением или прокатке ступенчатых (периодических профилей) труб и прутков.

Центрователь стержня 6 представляет собой втулку, установленную на подшипниках качения в подвижном корпусе, имеющем возможность перемещения на роликах по направляющим рамы. Стержень оправки проходит внутри втулки и таким образом центрируется. В исходном положении центрователь устанавливается непосредственно за рабочей клетью. По мере выхода из клетки прокатанная труба перемещает корпус центрователя, толкая его своим передним торцом.

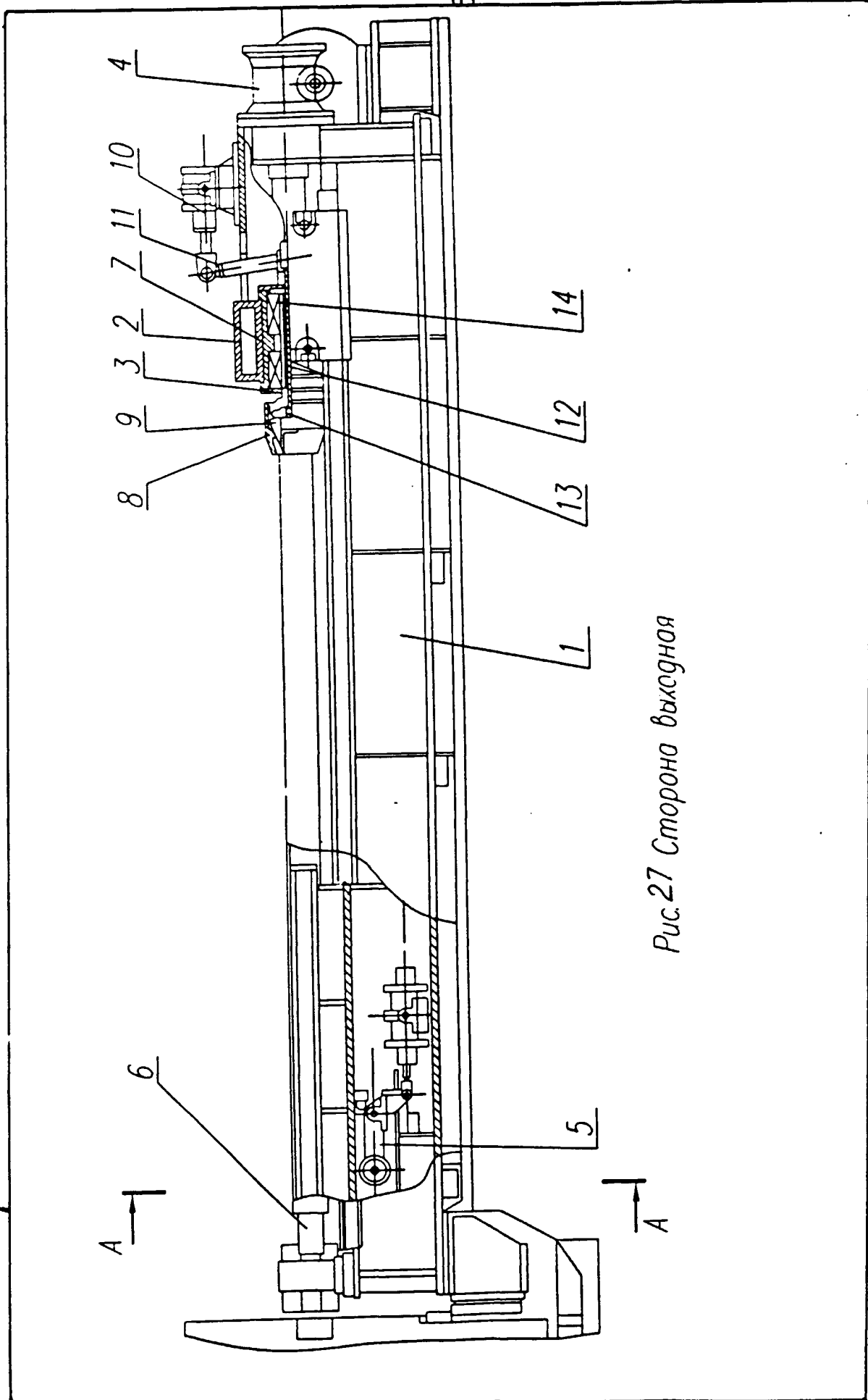


Рис. 27 Сторона выходная

A-A(рис.27)

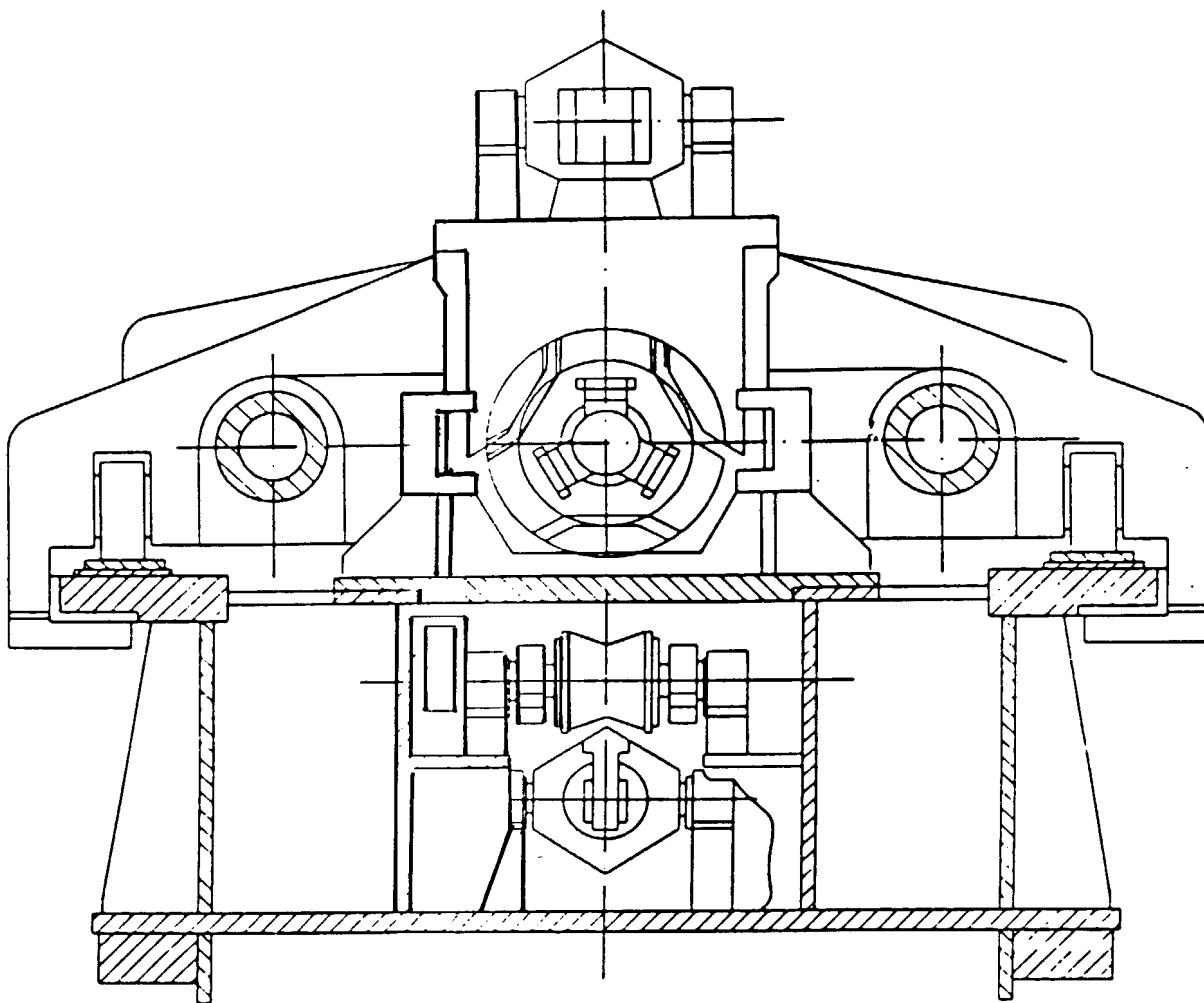


Рис. 28 Сторона выходная

При прошивке гильз каретка с патроном устанавливается в положение, обеспечивающее прошивку гильз заданной длины. Стрежень прошивной оправки закрепляется в патроне. На раму устанавливается один из сменных (в зависимости от диаметра гильзы) центрователей стержня, при этом подъемный ролик опускается.

При прокатке (раскатке) на удерживаемой оправке на раму вместо центрователя стержня устанавливается проводка.

При прокатке изделий ступенчатого профиля центрователь стержня и проводка не устанавливаются, а каретка с тянущим патроном в исходном положении устанавливается непосредственно к рабочей клети. Подъемный ролик в исходном положении опущен, а после ухода каретки из зоны ролика, последний (ролик) поднимается в положение, обеспечивающее поддержку прокатываемого изделия. При прокатке прутков допускается поддержание переднего конца прокатанного прутка с помощью патрона, отводимого от рабочей клети по мере выхода прутка из клети.

Главный привод 4 (рис. 21) предназначен для вращения рабочих валков с заданными энергетическими параметрами: скоростью и крутящим моментом.

В отличие от группового главного привода, предлагаемого соискателем в эскизно-техническом проекте, в рабочем проекте ЭЗТМ при изготовлении стана ПВП 20-60 в металле применил привод рабочих валков – индивидуальный. Каждый рабочий валок приводится во вращение от электродвигателя постоянного тока П2-500-141-594 ($N = 250$ кВт, $n = 500/1000$ об/мин. через редуктор ЦО-500 с передаточным числом $i = 6,3$. Тихоходные валы редукторов соединены с рабочими валками с помощью универсальных шпинделей с шарнирами на подшипниках качения. Угловая скорость рабочих валков регулируется в пределах 80 - 160 об/мин. путем изменения скорости вращения двигателя вверх от номинальной за счет ослабления магнитного поля, а в пределах 80 - 40 об/мин. – путем изменения скорости

вращения двигателя вниз от номинальной за счет изменения напряжения на якоре при постоянном моменте.

Гидросистема 5 (рис. 21) служит для подачи рабочей жидкости (масле) к гидроподушкам (гидроцилиндрам) рабочих валков клети и гидроцилиндру задающего устройства.

В начальной стадии проектирования и изготовления стана предполагалось, что он будет установлен в трубном цехе ЗЛС (завод легких сплавов Всесоюзного института легких сплавов - ВИЛСа), однако по ряду причин он был привязан и установлен в сортопрокатном цехе в начале линии действующего к тому времени стана 250. Место расположения стана выбрано так, чтобы к нему можно было подавать нагретые заготовки из индукционной установки, из печи сопротивления для титановых сплавов или из печи для алюминиевых сплавов.

Предусмотрены вариант предварительного нагрева заготовок в индукторе и выдержка в печи сопротивления для выравнивания температуры по всем объему заготовки. Такое расположение стана позволяет использовать его и в качестве заготовительного (впоследствии такую схему успешно применили и на заводе "Электросталь").

Окончательный вид линии стана ПВП 20-60 показан на рис. 29

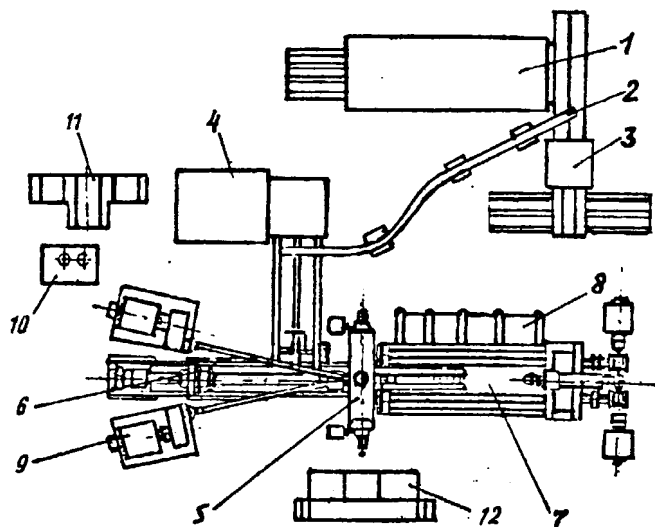


Рис. 29 Участок стана ПВП 20-60.

1 - печь нагрева алюминиевых заготовок; 2 - подвесной транспортер; 3 - индукционная установка для нагрева титановых сплавов; 4 - печь камерная для титановых сплавов; 5 - рабочая клеть стана; 6 - входная сторона; 7 - выходная сторона; 8 - приемный карман прокатанных изделий; 9 - электродвигатель главного привода; 10 - маслостанция; 11 - стенд для перекачки; 12 - пульт управления.

Техническая характеристика универсального стана в процессе проектирования неоднократно уточнялась, и окончательно были приняты следующие параметры.

При прокатке прутка

Размеры заготовки, мм

- диаметр	от 60 до 130
- длина	от 800 до 1800

Размеры готового прутка, мм

- диаметр	от 40 до 100
- длина	не более 3500

При прошивке гильзы

Размеры заготовки, мм

- диаметр	от 30 до 60
- длина	не более 800

Размеры гильзы, мм

- диаметр	от 25 до 58
- длина	от 1600 до 2000

Входная сторона

Усилие, развиваемое толкателем, кН

- при движении к клетки	157
при движении от клетки	100

Скорость перемещения толкателя, м/мин. не более 3

Рабочая клеть

Диаметр барабана, мм	800
Размеры валков, мм	
- диаметр бочки	от 220 до 400
- длина бочки	272; 300
- угол раскатки, град.	0; 4; 12
- угол подачи, град.	от 0 до 15
- ход плунжера гидроподушки, мм	от 0 до 20

Главный привод

Мощность двигателя (на один валок), кВт	250
Частота вращения двигателя, об/мин.	от 100 до 500
Передаточное число редуктора	6.3

Выходная сторона

Ход каретки, мм	не более 4500
Тянущее усилие каретки, кН	294
Скорость перемещения каретки, м/мин.	от 2.8 до 4.6

Сортамент выпускаемой продукции на стане ПВП 20-60 показан на рис. 30

Операция	Эскиз	Размер изделия, мм
Прокатка прутка		$D=25-150$ $l_{max}=4000$
Прокатка и раскатка труб		$D=20-140$ $\frac{2D}{D-d} = 11$ (3 валка) $\frac{2D}{D-d} = 30$ (2 валка)
Прокатка труб переменного сечения из трубной заготовки		D до 152 $(t_n - t_s)_{max} = 25$ $l_{max} = 4000$
Прокатка прутка переменного сечения		D до 150 $(D-d)_{max} = 50$ $l_{max} = 4000$

Рис. 30 . Сортамент получаемых изделий.

По результатам опытной эксплуатации стана и проведению впоследствии реконструкций отдельных узлов можно сделать следующие выводы:

По входной стороне стана.

В механизме перемещения стержня с оправкой (служащего также толкателем при прокатке прутков и состоящего из мощного гидроцилиндра и каретки с цепным приводом, который позволяет увеличить ее ход) слабым местом оказалась цепь, ее прочность не соответствовала усилию гидроцилиндра. Обрыв цепи происходил при сбоях в работе гидравлики, так как регулировка усилия гидроцилиндра за счет изменения давления масла весьма ненадежна.

Поэтому были разработаны варианты крепления стержня в каретке с установкой, предохраняющей пружины или через вмонтированный в каретку пневмоцилиндр. Был изменен способ крепления проводок, направляющих заготовку к рабочей клетке и разработан проект вращающейся проводки, так как трение горячих заготовок о желоб или направляющую трубу препятствовало их вращению при захвате вращающимися рабочими валками.

По рабочей клетке.

При испытании гидроподушек проявились недостатки в их конструкции, представляющей собой односторонний гидроцилиндр, работающий только на сведение рабочих валков для получения периодического (ступенчатого) профиля по длине заготовки (прутка) или гильзы для быстрой переналадки на другой размер, например для прокатки в два хода с одного нагрева.

Предполагалось, что барабаны с рабочими валками будут разводиться при сбросе давления масла в гидросистеме с помощью пружины и тяги, проходящий через нажимной винт и плунжер гидроподушки, а также этому должно способствовать давление металла на рабочие валки. Однако эта конструкция оказалась неработоспособной, по-видимому, из-за значитель-

ного трения в уплотнениях плунжера.

Гидроподушки могли служить месдозой для измерения усилия металла на валки по давлению запертого (перекрытого) масла, для чего был установлен образцовый манометр и манометр с тензометрическими датчиками для записи на осциллографе. Для измерения усилия на рабочие валки на верхнем барабане была установлена месдоза с тензодатчиками между нажимным винтом и плунжером.

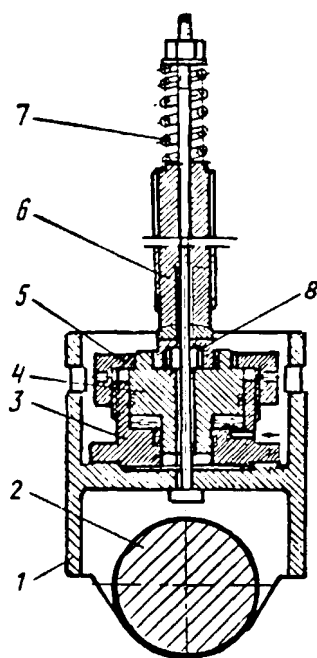


Рис. 31 Барабан с рабочим валком в сборе:

1 - барабан; 2 - рабочий валок; 23 - гидроцилиндр высокого давления; 4 - плунжер; 5 - гайка, регулирующая ход плунжера; 6 - нажимной винт; 7 - пружина обратного хода; 8 - месдоза тензометрическая.

Кроме того, для универсального стана ПВП 20-60 были изготовлены специальные барабаны со встроенными коническими редукторами и консольными грибовидными валками [22].

На рис. 32 показан общий вид барабана с грибовидным валком к универсальному стану поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60. На рис. 19

барабан с грибовидным валком показан в разрезе.

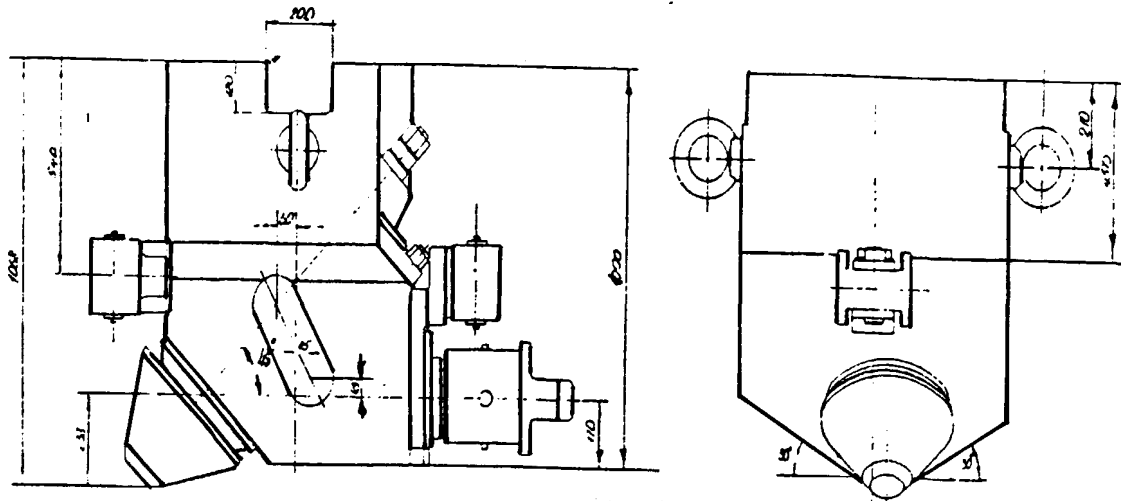


Рис. 32

По выходной стороне.

В первом варианте выходная сторона представляла собой универсальное устройство, которое состояло из нескольких довольно сложных механизмов и приспособлений, рассчитанных на экспериментальные прокатки без особых требований к производительности стана. Для промышленных целей спроектирован и изготовлен новый центрователь с тремя рядами расположенных под углом 120 градусов длинных роликов, с механизмом регулировки раствора роликов по диаметру прокатываемого изделия и подъемным верхним рядом роликов для боковой выдачи проката.

Центрователь установлен на подвижной раме с гидроприводом, позволяющим выводить задний конец прокатанного изделия за габарит рабочей клетки и сбрасывать его в приемный карман. В результате этого длина прокатываемых изделий была увеличена до 6600 мм.

По рабочему инструменту.

Основной рабочий инструмент стана - рабочие валки трехвалковой схемы прокатки были спроектированы, исходя из опыта черной и цветной

металлургии: расположение осей валков по центру барабана с углами раскатки 0, 4 и 12 градусов для проведения исследований. Предполагалось выбрать оптимальную величину угла раскатки с учетом преимущества расположения валков под углом - большее расстояние между шпинделями для размещения проводок, меньшие углы перекося осей валков и шпинделей; возможность увеличения размеров подшипников при тех же параметрах валка и повышения диаметра валка на входе (рис. 33).

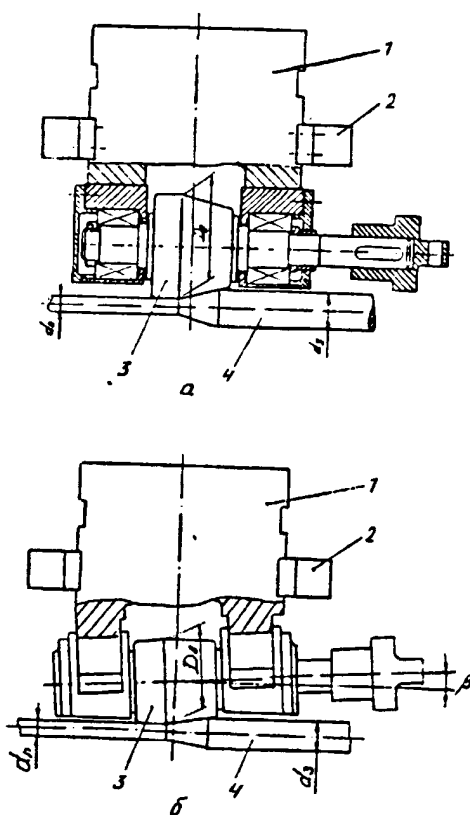


Рис. 33 . Рабочий валок:

- а - валок с нулевым углом раскатки; б - валок с углом раскатки $=4^\circ$,
 1 - барабан; 2 - упор механизма поворота барабана; 3 - рабочий валок;
 4 - прокатываемый пруток; D - диаметр валка, d - диаметр заготовки;
 d - диаметр прокатанного прутка.

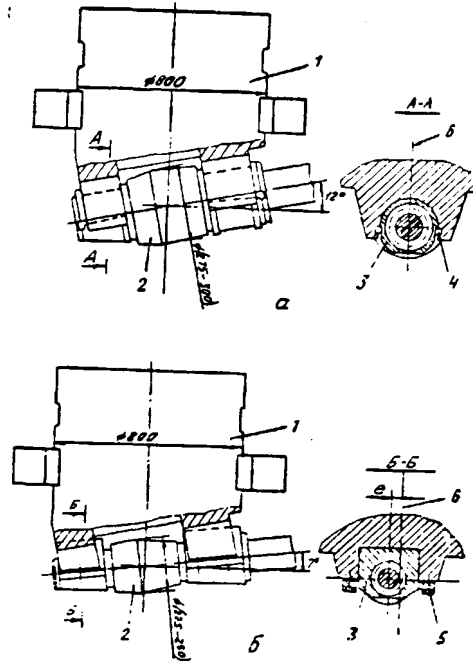


Рис. 34. Реконструкция рабочего валка:

а - до реконструкции; б - после реконструкции; 1 - барабан; 2 - рабочий валок; 3 - корпус подшипника; 4 - крепление корпуса подшипника на клиньях; 5 - крепление корпуса подшипника на болтах; 6 - ось барабана; е - тангенциальное смещение оси валка

Валки с углом раскатки 12 градусов оказались неработоспособными и были реконструированы (рис. 34). При этом форма корпусов подшипников качения была изменена, что улучшило условия их эксплуатации, позволило расположить валки со смещением относительно оси барабана (тангенциальное смещение) и в некоторых случаях заменять валки, не снимая крышки станины, что значительно сокращает время перевалки.

Калибровка валков.

При разработке калибровок рабочих валков для универсального стана ПВП 20-60 рассматривалось два варианта: безгребневую и гребневую (рис. 35).

Гребневая калибровка (рис. 35а) имеет обжимной участок, состоящий из двух конусов с малым углом на входе (что обеспечивает лучшие усло-

вия захвата заготовки), и гребень - участок с большим углом, на котором локализуется основная деформация (предположительно это должно способствовать лучшей проработке структуры).

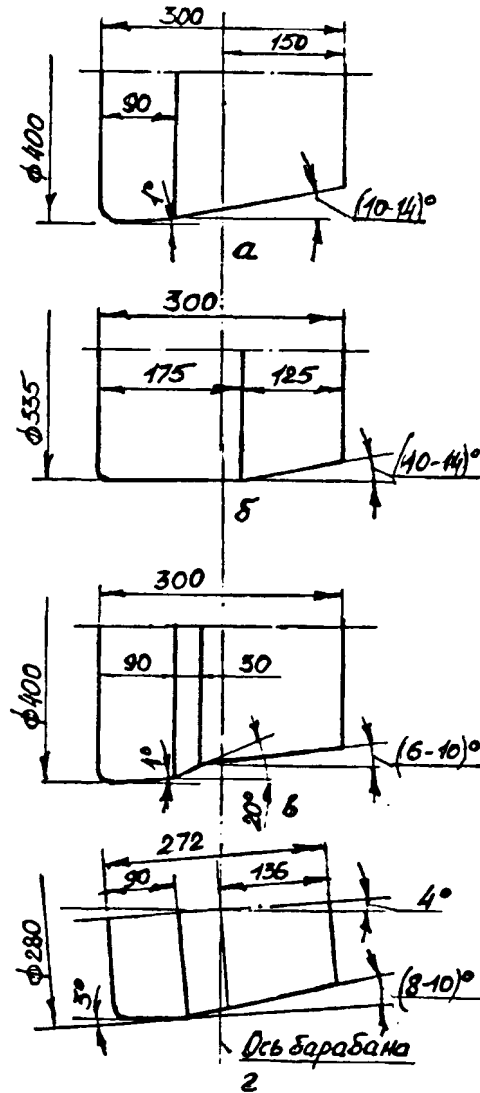


Рис. 35. Калибровки рабочих валков, устанавливаемые без тангенциального смещения.

Безгребневая калибровка имеет обжимной участок с одним конусом, что позволяет создать одинаковые условия захвата и деформации при любых соотношениях диаметров заготовки и прокатываемого прутка. Гребневая калибровка в этом отношении менее универсальна, поэтому на практике в большинстве случаев применяют безгребневую калибровку. Оба типа

валков имеют калибровочную часть, цилиндрическую или с малым корректирующим углом, обеспечивающим прилегание поверхности валка к прокатываемому прутку, в зависимости от диапазона углов подачи.

Калибровка, показанная на рис. 358 имеет увеличенный по длине калибрующий участок, занимающий более половины длины бочки валка.

Такая калибровка обеспечивает хорошее прилегание, независимо от угла подачи, и тем самым лучшую поверхность прокатанного прутка. Однако обжатие при такой калибровке минимально.

Установка рабочих валков в барабанах с тангенциальным смещением (рис. 368), когда проекция оси валка пересекает ось прокатки на калибрующем участке, позволяет упростить изготовление валка, поскольку калибрующая часть выполняется цилиндрической или конической с углом наклона образующей, равным углу раскатки. Однако такая геометрия валка рассчитана также на узкий диапазон углов подач.

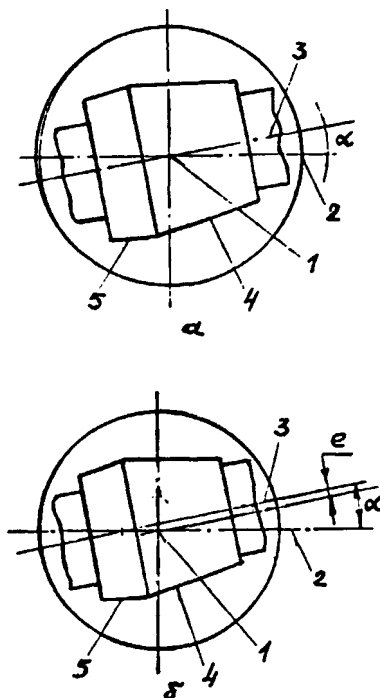


Рис. 36. Схема расположения рабочего валка в барабане:

- а - без тангенциального смещения; б - со смещением; 1 - ось барабана;
 2 - ось прокатки; 3 - ось валка; 4 - обжимная часть; 5 - калибрующая часть;
 е - тангенциальное смещение.

Элементарная методика построения профиля рабочих валков при малых углах раскатки и подачи сводится к определению формы поверхности вращения, касательной к задаваемой поверхности очага деформации (рис. 37).

Очаг деформации представляется в упрощенном виде - усеченным конусом, у которого меньшее основание соответствует готовому прутку, а большее - заготовке. При этом в контакте с рабочим валком находятся поверхность этого конуса и прилегающая поверхность прутка на длине, обеспечивающей калибровку прутка.

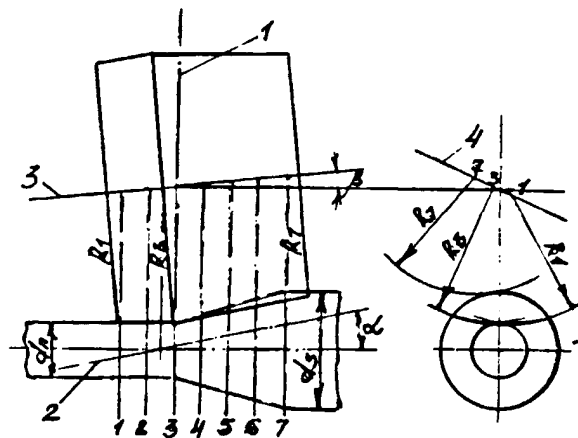


Рис. 37 . Схема построения профиля валка:

1 - ось барабана; 2-7 - проекции оси рабочего валка; α , β - углы подачи и раскатки; R - радиусы профиля валка.

Наклон образующей конуса очага деформации принимают, исходя из условий трения и захвата в пределах (10÷14) градусов. Относительное расположение осей валка и прутка в пространстве определяют, исходя из конструктивных параметров рабочей клетки: углов раскатки и подачи, тангенциального смещения оси валка. Размеры валка определяли по сечениям, перпендикулярным оси прокатки и задаваемым с шагом 5-20 мм. Определение радиуса валка в каждом сечении сводится, в свою очередь, к проведению окружности, касательной к сечению прутка. В данном случае при-

нимается допущение, что сечение валка – окружность, а не эллипс. Упрощенно профиль валка представляется прямолинейными образующими. При ремонте валка (переточке на меньший диаметр) углы конусов сохраняются.

Выводы:

1. Впервые в нашей стране и за рубежом создана конструкция универсальной рабочей клетки (в трех вариантах) для станов поперечно – винтовой прокатки, позволяющая поочередно осуществлять операции прокатки – прошивки – раскатки на двух-, трех- и четырехвалковых схемах с помощью одной станины и кассетной перевалки рабочих валков, с целью реализации преимуществ каждой схемы прокатки.

2. Каждый из вариантов конструкции универсальной рабочей клетки стана поперечно – винтовой прокатки защищен авторскими свидетельствами на соответствующие изобретения.

3. Соискателем выполнен технический проект конструкции линии стана поперечно – винтовой прокатки ПВП 20-60 промышленного назначения, в основу которого заложено использование одной универсальной рабочей клетки, позволяющей осуществлять технологический процесс законченного цикла «прокатка – прошивка – раскатка» для изготовления как цельных, так и полых тел вращения (прутки, гильзы, трубы).

4. Конструкция универсальной рабочей клетки стана поперечно – винтовой прокатки ПВП 20-60 позволяет, помимо гладких изделий, изготавливать изделия периодического профиля, т.е. с изменением наружного диаметра по длине прокатываемого прутка, а также полых изделий с различными наружными и внутренними диаметрами по длине этих изделий.

5. При выполнении рабочего проекта и изготовлении стана поперечно – винтовой прокатки ПВП 20-60 Электростальским заводом тяжелого машиностроения (ЭЗТМ) был взят за основу технический проект, выполненный соискателем, в том числе реализована идея универсальности

рабочей клетки стана ПВП 20-60, позволяющая поочередно осуществлять различные схемы прокатки – прошивки – раскатки: двух- и трехвалковую, а также возможность производить гладкие и полые изделия периодического профиля. Стан ПВП 20-60 изготовлен в металле, смонтирован и эксплуатируется на ЗЛС ВИЛСа.

6. Созданный универсальный стан поперечно – винтовой прокатки ПВП 20-60, помимо практической целесообразности, имеет и научную ценность, так как дает возможность исследователям изучать общие закономерности и различия, сравнивать достоинства и недостатки различных схем прокатки – прошивки – раскатки (двух- и трехвалковую) при совершенно одинаковых технических и технологических условиях, одними и теми же рабочими инструментами на одной и той же универсальной рабочей клетки, что исключает необходимость введения различных поправочных коэффициентов, уменьшает степень погрешностей и повышает достоверность проводимых на этой клетки (стане) экспериментов.

7. Применяя в процессе поперечно – винтовой прокатки действие механизмов подпора и натяжения, которые изготовлены в составе стана ПВП 20-60, можно составлять различные схемы напряженно – деформированного состояния прокатываемого изделия с целью достижения наиболее благоприятных условий технологического процесса прокатки (минимальные энергозатраты, наибольшую производительность, лучшее качество поверхности изделий и т.п.).

Глава 3. Перспективы использования универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60

3.1. Расширение технологических возможностей стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60

Разработка отечественными учеными новых технологических процессов (прокатка мелющих шаров и шариков для подшипников коротких тел вращения - штифтов и втулок, изделий с винтовой и резьбовой поверхностью, ребристых труб, коротких изделий с периодически профилем и др.), создание на их основе специальных станов поперечно-винтовой прокатки для изготовления изделий машиностроительного назначения позволило резко расширить возможности поперечно-винтовой прокатки, увеличить сортамент впускаемой продукции, используя при этом те же схемы прокатки, т.е. двух- или трехвалковые. При этом возможности использования двухвалковой схемы прокатки расширились в большей степени, нежели трехвалковой.

Двухвалковая схема: прокатка шаров и шарикоподшипников; прокатка коротких тел вращения; прокатка коротких тел с периодическим профилем; прокатка изделий с винтовой (резьбовой) поверхностью; прокатка червячных пар.

Трехвалковая схема: прокатка изделий с винтовой (резьбовой) поверхностью; прокатка червячных пар; прокатка ребристых труб.

Для утверждения о возможности использования универсальной рабочей клетки стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 для производства вышеперечисленных видов изделий необходимо рассмотреть особенности каждого технологического процесса в отдельности.

3.1.1. Прокатка круглых тел - шаров для мельниц и подшипников

Первые опыты по прокатке шаров в Советском Союзе были осуществлены еще в 1939-1940 гг. Центральным бюро тяжелого машиностроения (ЦБТМ) совместно с ГПЗ-1. Тогда же на модели прокатного стана с валками диаметром 100 мм была проведена пробная прокатка шаров диаметром 13 мм. Эти опыты показали возможность прокатки шаров [23].

Этот технологический процесс позднее был основательно разработан, освоен и внедрен в промышленность ВНИИМЕТМАШем под руководством и при участии А.И.Целикова, С.П.Грановского, В.И.Ефанова, Н.В.Мехова и Н.А.Егорова.

Суть поперечной прокатки (частный случай поперечно-винтовой прокатки - когда ось прокатываемого изделия и проекции осей рабочих валков, на поверхности которых нарезаны винтовые калибры, имеющие обратные (негативный) профиль по отношению к прокатываемому изделию (шары).

Передний конец прутка захватывается ребрами валков, начинает вращаться и, продвигаясь вдоль оси калибра, постепенно обжимается, приобретая форму требуемого изделия. В конце калибра изделие отделяется и выбрасывается из раствора валков. При этом реборды валков захватывают новую порцию металла и процесс осуществляется непрерывно, пока не прокатывается весь пруток. Деформируемая валками заготовка удерживается в растворе валков точно по оси прокатки с помощью направляющих линеек (рис. 38).

Калибровка рабочих валков выполняется таким образом, чтобы было обеспечено постепенное внедрение реборд валков в обжимаемую заготовку.

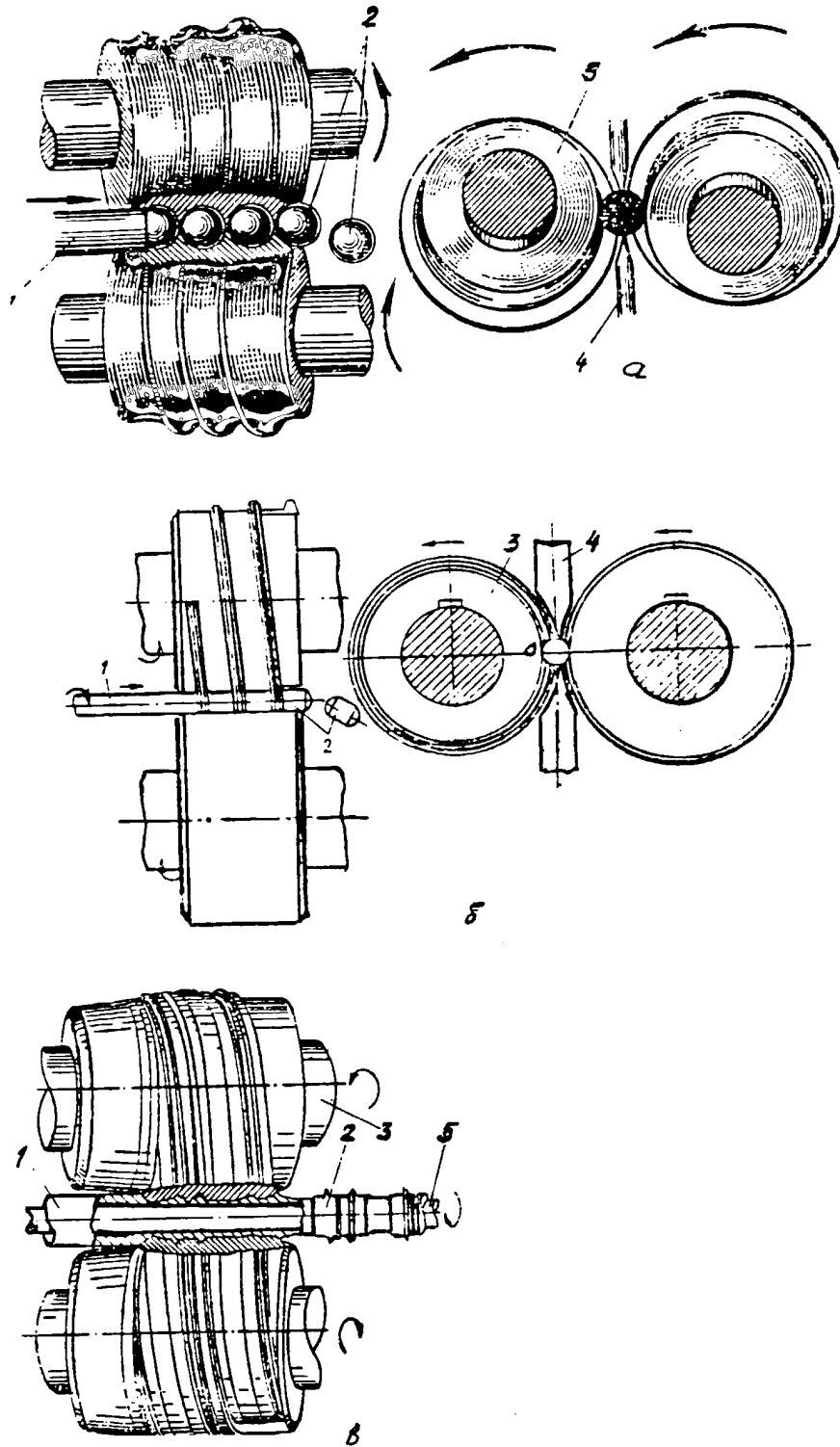


Рис. 38. Схема поперечно-винтовой прокатки шаров.

1 - заготовка; 2 - готовые изделия; 3 - рабочие валки с винтовыми калибрами; 4 - направляющие поддерживающие линейки.

Прокатка мелющих шаров

Исходным металлом для прокатки шаров служат стандартные прутки горячекатанной стали, наиболее ходовых размеров по диаметру: 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120. При этом диаметр шаров соответствует следующим размерам: 26,3, 31,5, 41,5, 52, 62, 73, 83, 104, 125.

Химсостав материала выбирается таким образом, чтобы изготовленные шары, охлаждаясь в воде после выхода их из раствора валков, закаливались с целью их минимального износа.

Нагрев прутков осуществляют до 950-105⁰С с целью уменьшения нагрузки на рабочие валки.

Стан настраивают по прутку наибольшего диаметра, в связи с тем, что, если настроить стан по прутку минимального диаметра, то при подаче в раствор валков прутка наибольшего диаметра в калибрах валков произойдет переизбыток металла, что ведет за собой к увеличению разрывающих напряжений и как следствие - вскрытие внутренней полости изделия (аналогия вскрытию полости заготовки при прошивке на двухвалковой схеме прошивки).

При производстве мелющих шаров требования по качеству поверхности менее жесткие, поэтому перемычки, соединяющие отформованные шары, полностью отделяются непосредственно в валках стана, что достигается небольшим смещением калибра одного валка относительно другого в осевом направлении. При такой установке валков отформованный шар начинает вращаться в калибре не только вокруг оси прокатки, но и в перпендикулярном направлении. При этом перемычка срезается ребордой валков и вдавливается в тело шара. Отделенный шар продолжает обкатываться на отделочном участке калибра, остатки перемычек заглаживаются и из раствора валков выходит полностью оформленный, имеющий гладкую поверхность.

Еще одной отличительной особенностью конструкции рабочих валков для прокатки мелющих шаров является применение многозаходных винто-

вых калибров, что резко повышает производительность прокатных станов. В настоящее время применяются рабочие валки с четырьмя, тремя и двухзаходными калибрами, производительность стана при этом достигает до 3800 шаров в минуту с диаметром 40 мм. Рабочие валки изготавливают из стали марки 35хГСА диаметром 280-300 мм.

Прокатка шаров подшипников

Особенностью производства шаров подшипников является задача получения шаров с хорошим качеством поверхности без плен и закатов. Для этого калибры валков проектируют таким образом, чтобы перемычка, соединяющая шары при окончании их формировки, плавно подрезалась, и шары выходили из валков строго по оси прокатки. Это достигается также и точной настройкой рабочих валков в осевом направлении.

Повышенную овальность шаров устраняют регулировкой угла наклона рабочих валков. Угол наклона осей валков (угол подачи) примерно равен углу подъема реборды вблизи ее основания (по дну калибра). Изменяя угол наклона валков, можно увеличивать или уменьшать осевую подачу металла в валки. При уменьшении угла подачи металла в раствор валков сокращается, заготовка начинает отставать от реборды, форма не полностью заполняется металлом, на поверхности шаров появляются винтовые канавки. С увеличением угла подачи этот дефект исчезает. При чрезмерно большом угле подачи происходит переизбыток металла в калибре, а внутри шара от разрывающих напряжений происходит вскрытие полости.

Плены и закаты перемычек появляются из-за нарушения осевой настройки валков. При незначительном несовпадении калибров валков вдоль оси прокатки (0,1-0,2 мм) перемычки срезаются и шары выходят из валков без перемычки. При большем осевом смещении калибров валков шар преждевременно разворачивается в калибре, разрывая перемычки, которые еще не достигли требуемого утонения, и которые затем закатываются в тело шара, образуя на его поверхности плены и закаты.

При прокатке шаров подшипников от 1" до 1 3/8" следует применять диаметр рабочих валков в пределах 205-230 мм, а при прокатке шаров до 2" (50 мм) диаметр рабочих валков в пределах 280-300 мм с вращением валков до 180 об/мин.

Максимальные давления на рабочий валок при прокатке шаров подшипников составляют от 60 до 200 кН, при прокатке шаров мелющих от 12 до 1250 кН, в зависимости от диаметра прокатываемых шаров (41,5-125 мм).

Крутящий момент на двух шпинделях рабочих валков при прокатке шаров подшипников от 1590 Н м до 1860 Н м (диаметр шаров 1 1/16") до 16500 Н м при диаметре шаров 2" [23].

3.1.2. Прокатка коротких тел вращения "штифты, втулки"

Цилиндрические изделия в массовом производстве изготавливают на машиностроительных заводах либо в качестве заготовок для последующей механической обработки на автоматических линиях, либо в виде готовых изделий, например, мелющих цилиндров, применяемых для тонкого помола цемента. Такие изделия получают точением или рубкой заготовок в штампе.

Первый способ малопроизводителен и имеет большие потери металла в стружку, а второй не обеспечивает получение ровных торцевых поверхностей.

С целью повышения производительности и улучшения качества группой ученых ВНИИМЕТМАШа С.П.Грановским, В.И.Ефановым и Г.М.Глазковым разработан и освоен новый технологический процесс прокатки в винтовых калибрах между гладким и калиброванным валком [23].

Схема процесса прокатки представлена на рис. 39.

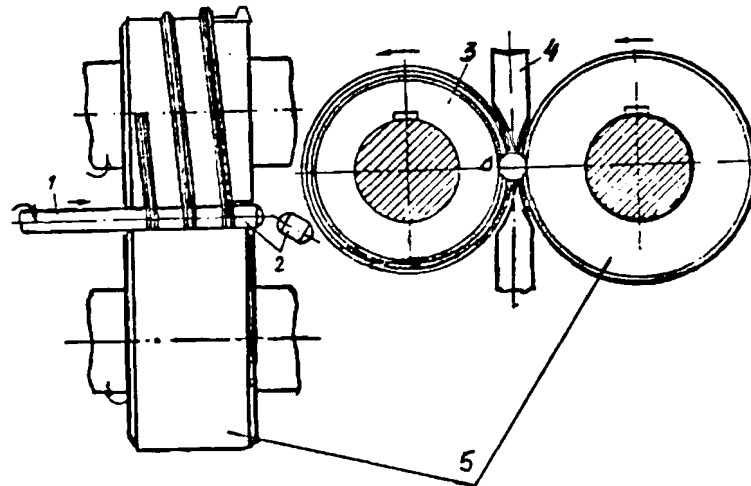


Рис. 39. Схема поперечно-винтовой прокатки коротких цилиндрических изделий.

1 - заготовка; 2 - готовое изделие; 3 - калиброванный рабочий валок;
4 - проводки; 5 - гладкий валок.

Формовка цилиндрической заготовки осуществляется винтовой ребордой калиброванного валка. Гладкий валок служит лишь опорой обжимаемой заготовки. При прокатке изделий между гладким и калиброванным валком по сравнению с двумя калиброванными валками упрощается настройка стана (клетки) и появляется возможность прокатывать изделия малого диаметра, так как значительно увеличивается толщина рабочей проводки. Для обеспечения равномерного износа проводок диаметр гладкого рабочего валка принимают на 5-10 мм больше калиброванного или же гладкий валок оборудуют независимым от калиброванного валка независимым приводом.

Изделия, полученные подобным способом имеют диаметр в пределах 10-25 мм.

Диаметр рабочих валков, применяемых при этом способе прокатки, составляет в пределах 220-240 мм, длина бочки валка - 250 мм [23].

3.1.3. Прокатка профилированных труб для втулочных изделий типа велосипедных втулок

Существовавшие ранее способы изготовления велосипедных втулок, автомобильных и тракторных, а также кольца подшипников качения из поковок или из толстостенных бесшовных труб весьма трудоемки, не поддавались механизации и характеризовались значительным расходом металла из-за больших припусков на обработку поковок.

Для устранения указанных недостатков исследователями ВНИИМЕТМАШа С.П.Грановским, Н.В.Меховым, И.С.Побединым, Г.С.Майзелис и Н.В.Слюсарем предложен новый технологический процесс изготовления втулочных изделий [24, 25].

Исходным металлом для прокатки служит пруток (горячекатанная круглая сталь марки 15Х) длиной 900 мм, нагретой до 1350 градусов, который прошивается на двухвалковой прошивной клети, где из прутка получается гильза диаметром 60х35 длиной 1300 м. Внутри полученной гильзы продевается длинная оправка, и гильза вместе с оправкой подается в раствор двухпрофилированных валков. Подача металла в валки осуществляется непрерывно, пока не прокатается вся гильза.

Схема деформация металла при прокатке заготовок велосипедных втулок представлена на рис. 40.

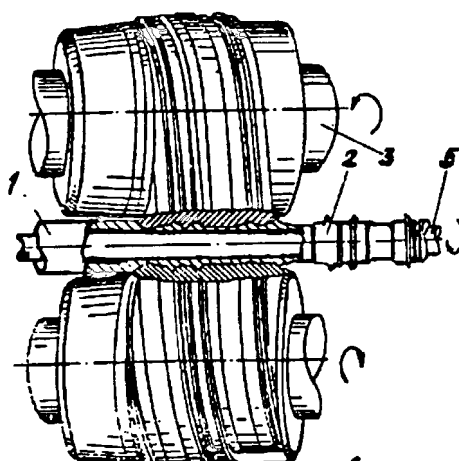


Рис. 40. Схема поперечно-винтовой прокатки втулочных изделий.
1 - заготовка; 2 - готовые изделия; 3 - рабочие валки с винтовыми калибрами;
4 - оправка.

Затем из прокатанной профильной трубы извлекается оправка, и труба передается на стеллаж, где она охлаждается.

Профильные трубы дисками разделяются по перемычкам на штучные заготовки, травятся и поступают на дальнейшую механическую обработку.

В отличие от прокатки профильных труб для втулочных изделий прокатка таких труб для колец подшипников ведется на короткой закрепленной в осевом направлении оправке, благодаря чему прокатанный участок трубы ребордами валков непрерывно стягивается с оправки и, таким образом, отпадает в дополнительных операциях извлечения оправки, их охлаждения и смазки.

3.1.4. Прокатка изделий с винтовой (резьбовой) поверхностью

При поперечно-винтовой прокатке изделий с винтовой поверхностью применяются две схемы: двухвалковая и трехвалковая. При двухвалковой схеме прокатки заготовка удерживается при помощи поддерживающих проводок (линеек) или подвижных центров.

При трехвалковой схеме прокатки изделий с винтовой поверхностью необходимость в поддерживающих устройствах отпадает (рис. 41).

При поперечно-винтовой прокатке с винтовой поверхностью используются валки двух типов: с кольцевыми и винтовыми калибрами.

В свою очередь, в зависимости от типа калибров валков и профиля на изделия с винтовой поверхностью возможны различные варианты поперечно-винтовой прокатки изделий с винтовой поверхностью.

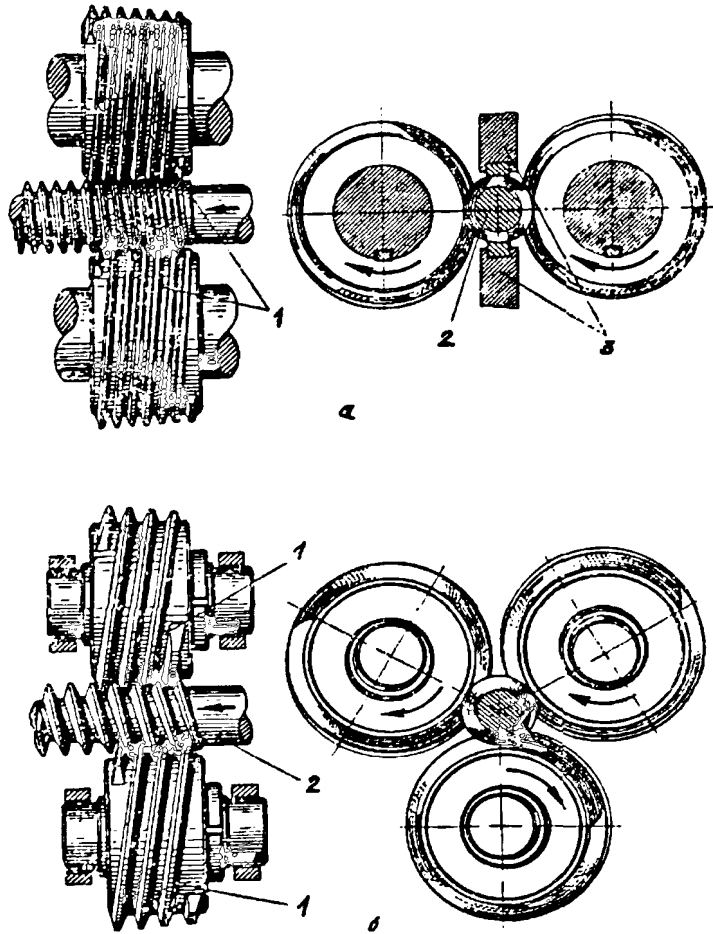


Рис. 41. Схема поперечно-винтовой прокатки изделий с винтовой поверхностью:
 а - двухвалковая; б - трехвалковая;
 1 - рабочие валки с винтовыми калибрами; 2 - заготовки; 3 - проводки.

Вариант 1. Валки с кольцевыми калибрами; угол перекоса осей валков равен углу подъема прокатываемого профиля на заготовке (рис. 42а).

$$\alpha = \beta_{\text{заг}} \text{ (а)}$$

Вариант 2. Валки с винтовыми калибрами, направление которых разное с направлением прокатываемого профиля из изделий с винтовой поверхностью; угол подъема профиля на заготовке больше угла подь-

ема винтовых калибров на валке. В этом случае угол перекоса осей валков

$$\alpha = \beta_{\text{заг}} - \beta_b \text{ (б)}$$

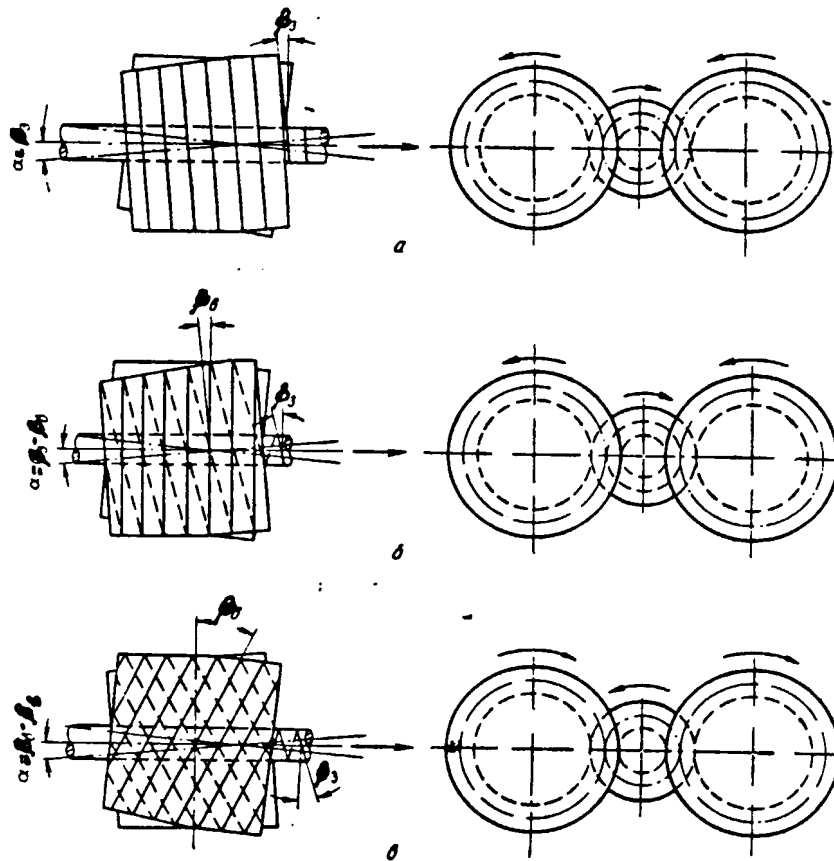


Рис. 42 . Схема прокатки в валках с кольцевыми и винтовыми калибрами, где β_b - угол подъема винтовых калибров на валке.

По этому варианту прокатка осуществляется при меньших значениях угла перекоса осей валков по сравнению с прокаткой валками, имеющими кольцевые калибры.

Вариант 3. Валки с винтовыми калибрами, направление которых разноименное с направлением прокатываемого профиля на изделия с винто-

вой поверхностью: угол подъема профиля на заготовке меньше угла подъема винтовых калибров на валке

$$\alpha = \beta_b - \beta_{\text{заг}} (\text{в})$$

Валками с кольцевыми калибрами (одним комплектом валков) можно прокатывать левую и правую резьбу одного шага на заготовках разных диаметров, но с углом подъема резьбы не более 6-7 градусов. При работе валками с кольцевыми калибрами не требуется тщательная синхронизация их вращения, что упрощает конструкцию привода вращения. Однако такие валки сложны в изготовлении.

Валки с винтовыми калибрами имеют свои преимущества перед валками с кольцевыми калибрами.

1. Прокатка осуществляется при меньших углах перекоса осей валков, что очень важно при производстве многозаходных резьб и червяков, так как допустимые величины углов перекоса осей валков определяются конструктивными возможностями оборудования.

2. Прокатка валками с винтовыми калибрами осуществляется при меньших величинах осевой подачи и радиального единичного обжатия заготовки, чем при прокатке валками с кольцевыми калибрами при одинаковом угле заборного конуса валков. Это имеет особое значение при холодной прокатке резьбы, когда необходимо уменьшить единичное радиальное обжатие заготовки с целью снижения давления металла на валки и мощности привода вращения валков.

3. При одинаковых режимах прокатки (то есть равенстве единичных радиальных обжатиях) ширина валков с винтовыми калибрами меньше, чем ширина валков с кольцевыми калибрами, благодаря чему снижаются усилия на валки и мощности привода, что в свою очередь дает возможность прокатывать более крупные профили с винтовой поверхностью не менее мощном и жестком оборудовании.

3.1.5. Прокатка ребристых труб

Возможность получения ребристых труб методом поперечно-винтовой прокатки определяется пластическими свойствами и сопротивлением деформации прокатываемого металла. Наиболее допустимая деформация при прокатке ребристых труб ограничивается не пластическими свойствами материала заготовки, а его сопротивлением деформации и интенсивностью наклепа в условиях этой деформации.

Применяемая схема при поперечно-винтовой прокатке ребристых труб - только трехвалковая (рис. 43).

Этим способом получают эффективные по теплопередаче и экономичные в изготовлении трубы с поперечными ребрами из черных и цветных металлов. Прокаткой можно получать трубы как с низкими так и с высокими тонкими ребрами. В зависимости от пластичности и механических свойств металла применяют горячую или холодную прокатку ребристых труб.

В холодном состоянии прокатываются все низкорребристые трубы, а также трубы с высокими ребрами из алюминия, меди, биметаллов; в горячем - высокорребристые трубы из стали и сплавов, которые при обработке давлением в холодном состоянии имеют низкую пластичность и высокое сопротивление деформации.

Исходной заготовкой для поперечно-винтовой прокатки ребристых труб служат гладкие трубы, их формовка производится тремя валками, оси которых наклонены к оси прокатки на величину угла подачи. Во время прокатки вращающиеся валки захватывают заготовку и сообщают ей вращение и осевые перемещения в процессе которых и происходит постепенное образование ребер.

Поперечно-винтовая прокатка ребристых труб осуществляется тремя рабочими валками, имеющие кольцевые или винтовые калибры (рис. 43).

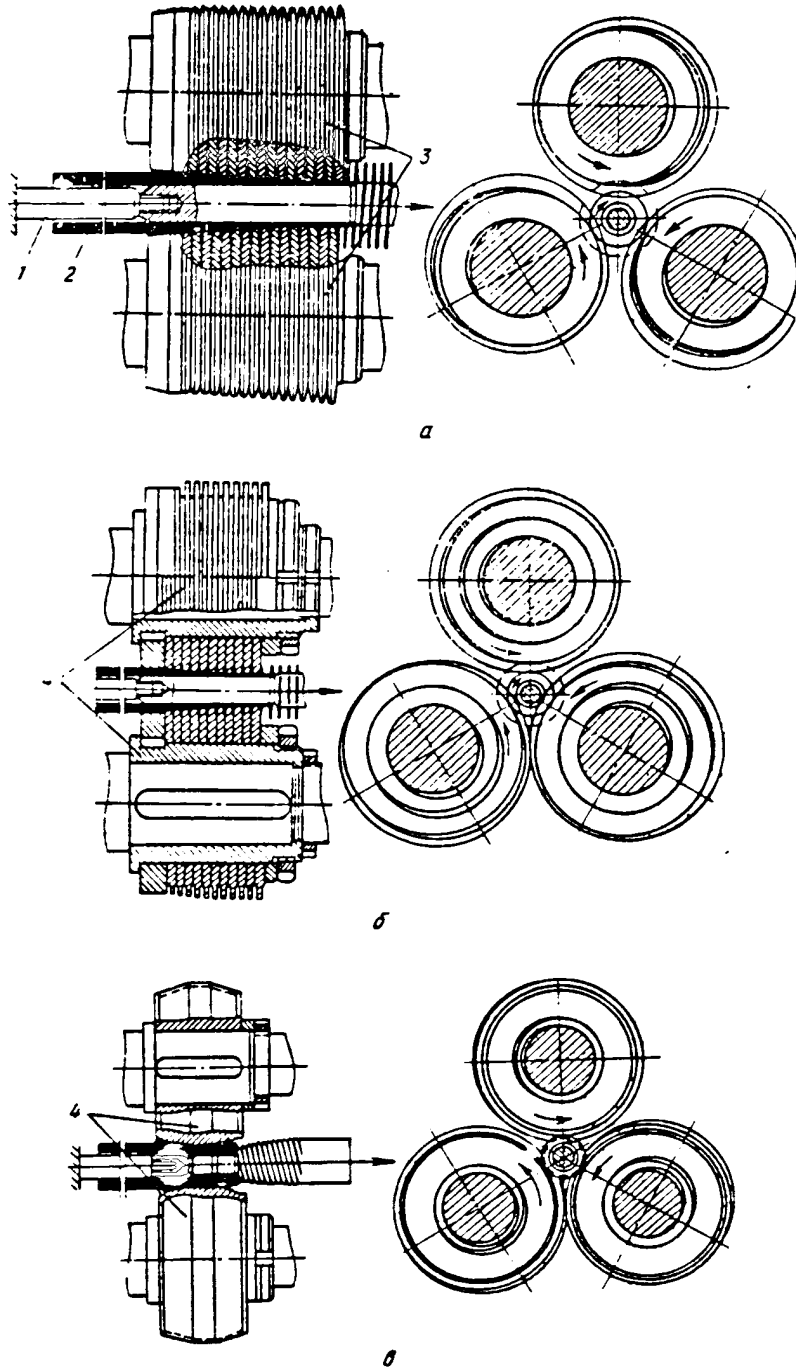


Рис. 43 . Схема поперечно-винтовой прокатки ребристых труб:
 а - высокоресристых в кольцевых калибрах; б - высокоресристых в вин-
 товых калибрах; в - низкоресристых в винтовых калибрах; 1 - оправки; 2 -
 заготовка; 3 - рабочие валки с кольцевыми калибрами; 4 - рабочие валки с
 винтовыми калибрами.

Валки с винтовыми калибрами используются для производства труб с кольцевыми и винтовыми ребрами. При прокатке труб с кольцевыми ребрами угол подачи (угол наклона оси валков к оси прокатки) примерно равен углу подъема винтовых калибров валка и колеблется в пределах 2-6 градусов.

При прокатке труб с винтовыми ребрами угол подачи по абсолютной величине равен разности углов подъема винтовой поверхности ребер на заготовке и винтовых калибров рабочего валка.

Метод прокатки винтовых калибров универсальнее, так как он позволяет изменять угол подачи за счет изменения геометрических параметров рабочего валка. Практически это дает возможность прокатывать трубы с большим по величине шагом ребер, используя при этом валки меньшей ширины (бочки), при меньших величинах деформирующих усилиях.

Особенностью станов для прокатки низкорребристых труб является то, что его рабочая клетка выполнена с двумя неподвижными и одним подвижным валком. Радиальная подача подвижного валка осуществляется при помощи нажимного механизма, состоящего из шатуна и эксцентрикового вала, приводимого в движение от электродвигателя через червячный редуктор.

Скорости вращения рабочих валков для размеров оребренных труб в диапазоне 20-40 мм составляют 80-250 об/мин. Наибольший диаметр валков определяют из условия возможности прокатки труб наименьшего диаметра при трехвалковой схеме прокатки.

Выводы:

Проанализировав конструкторские особенности станов поперечно-винтовой прокатки изделий специального машиностроительного назначения и сравнив их с возможностями универсальной рабочей клетки стана ПВП 20-60 можно сделать следующие выводы:

1. Конструкция универсальной рабочей клетки стана ПВП 20-60 способна обеспечить создание схем: двух или трехвалковой прокатки, необходимых

для производства практически всех указанных выше изделий специального назначения (шары, втулки, штифты, изделия с винтовой поверхностью, ребристые трубы и т.д.);

2. Габариты заготовок (диаметр, длина), используемых при производстве изделий специального назначения, укладываются в интервал паспортных данных стана ПВП 20-60;

3. Размеры инструментов (диаметры валков, их ширина) обороты вращения рабочих валков, углы подачи и раскатки, используемых при поперечно-винтовой прокатке изделий специального назначения также не превышают паспортных технологических возможностей, заложенных в универсальную рабочую клетку стана ПВП 20-60;

4. Энерго-силовые параметры – мощности прокатки, крутящие моменты, усилия на рабочий валок при прокатке изделий специального назначения (шаров, коротких тел вращения, изделий с винтовой поверхностью, ребристых труб и др.) значительно ниже паспортных данных универсальной рабочей клетки и самого стана ПВП 20-60, что говорит о конструкторской, технической и технологической возможностях рабочей клетки стана ПВП 20-60 выполнять указанные виды прокаток с различными схемами (двух и трехвалковые) при наличии соответствующего профилирующего инструмента (калиброванных валков).

5. Прилагаемая таблица сопоставимости технико-технологических характеристик различных станов для прокатки изделий специального назначения со станом поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 наглядно демонстрирует вышеперечисленные выводы (таблица 2).

6. В целом возможности универсальной рабочей клетки стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 наглядно показано на схеме, представлено на рис. 44.

Таблица сопоставимости технико-технологических характеристик стана ПВП 20-60

Параметры	Универсальный стан ПВП 20-60	Стан для прокатки круглых тел - шаров	Стан для прокатки коротких тел вращения (штулки)	Стан для прокатки изделий с винтовой поверхностью (резьбовые)	Стан для прокатки червячных фрез и валов	Стан для прокатки ребристых труб
Возможные схемы прокатки	Совмещенные 2-х и 3-х валковые	2-х валковые	2-х валковые	2-х и 3-х валковые	2-х и 3-х валковые	3-х валковые
Диаметр заготовки, мм	d = 60 – 130	d = 25 – 45 (подш.) d = 40 – 125 (шары)	d = 5 – 36	d = 40 – 80	d = 30 – 150	d = 20 – 40
Длина заготовки, мм	800 – 1800		600 – 900 – 1300	800 – 1000	1000	1500 – 6000
Размеры готовых изделий, мм	пруток, d=40-100, l=6300 гильза, d=25-58, l=1600-2000	d = 26 – 125 l = 2500 – 4000 – 6000	d = 3 – 6 l = 6 – 25	d = 40 – 60 l = 300	d = 30 – 150 l = 2000	d = 20 – 60 l = 6000
Диаметр рабочих валков, мм	220 – 400	300	240	250 – 300 160 – 250	190 – 285	90 – 100
Длина бочки рабочих валков, мм	272 – 300	250 – 300	250	90 – 140 100 – 200	125 – 150	150 – 250
Угол подачи (угол наклона), °	0 – 15	2 – 5	0 – 2	1,5 – 2	1,5 – 2 0 – 7	2 – 6
Мощность двигателя на один валок, кВт	250	160	40	40 – 55	6 – 18	30
Частота вращения рабочих валков, об/мин	40 – 160	75 – 180	125 – 150	12 – 190	20 – 60	80 – 200
Температура нагрева заготовок, °С	0 – 300 – 2000	950	1300	1000	1500	950
Усилия на рабочий валок, т	24,5 – 58,8	6 – 12,5	0,7 – 15	11,8 – 25,9	8 – 14 – 30	3 – 12
Момент крутящий Мкр, кН · М	9,8 – 24,5	7 – 15	3 – 8	1,12 – 3,9	12 – 20	5 – 17

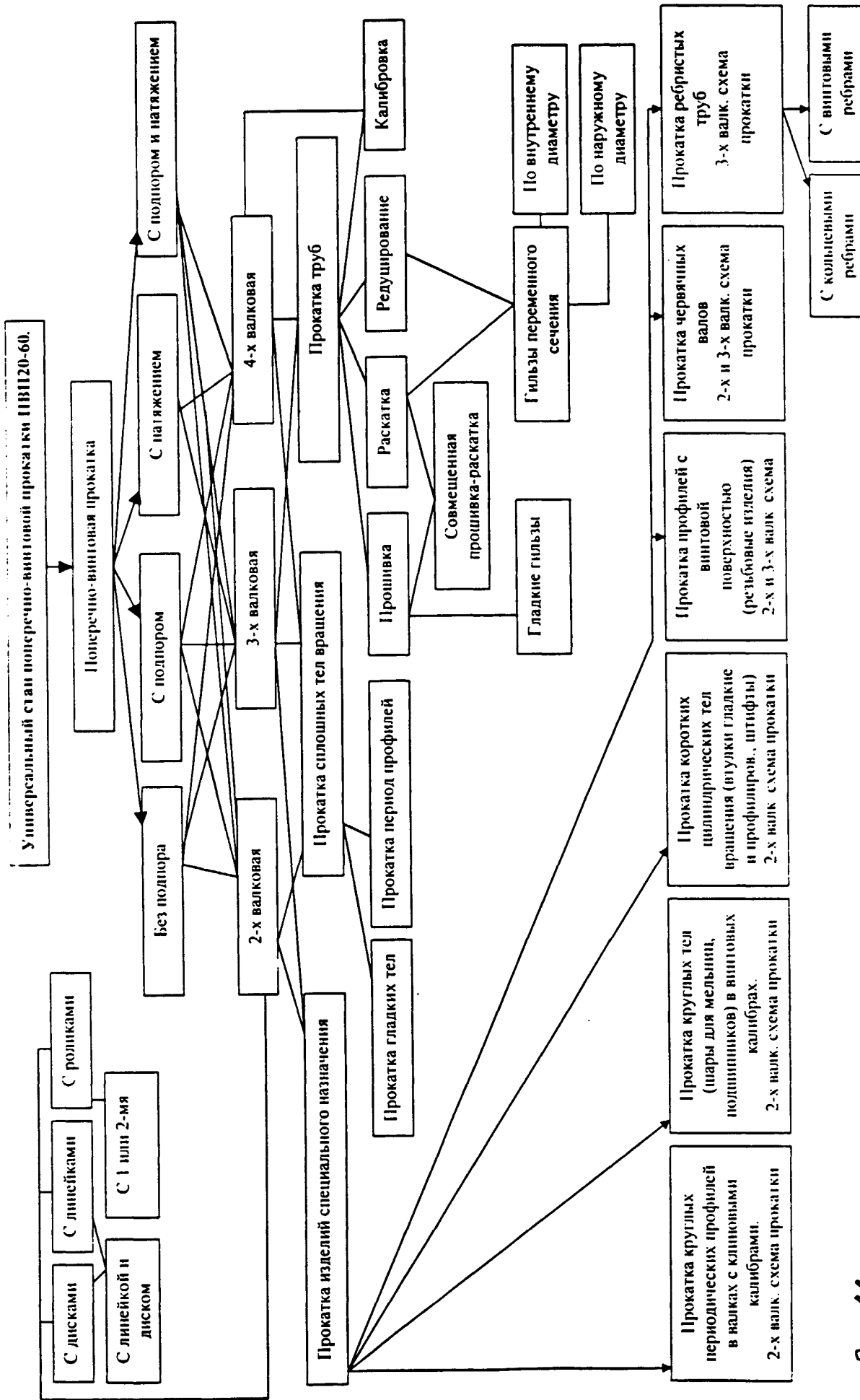


Рис. 4А. Технологические возможности универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60

Глава 4. Трехмерное конечно-элементное моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки. Аналитические исследования

4.1. Общие соображения и допущения

Современная теория прокатки позволяет определить главным образом интегральные характеристики напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации – вытяжку, уширение, усилие и момент прокатки. Эти методы были с успехом использованы рядом ученых [12, 34, 35] и для определения силовых параметров поперечно-винтовой прокатки, при этом приходится вводить определенные допущения (жестко-пластическая среда, замена дуг контакта хордами, отсутствие пластической деформации во внешних зонах и т.д.).

Основой решения задач является совместное решение уравнений равновесия элементарных объемов, условий объемного сжатия при малых деформациях и несжимаемости материала при больших деформациях, уравнений перехода в пластическое состояние и удовлетворение полученных решений граничным условиям. В общем случае равновесие движения элементарного объема материала без учета массовых и инерционных сил в случае цилиндрической системы координат описывается уравнениями [36]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \end{cases}$$

Условие несжимаемости материала при больших деформациях:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

где v_r, v_θ, v_z – скорости деформации.

Условие пластического перехода может быть представлено в виде поверхности эллипсоида, построенного на осях главных напряжений, размеры которого увеличиваются соответственно принятому закону упрочнения.

Тем не менее в общем виде эти уравнения не имеют замкнутого решения, поэтому не определяется детальное описание действующих напряжений и деформаций в очаге деформации и вне него, а также не может оцениваться их влияние на структуру металла.

Традиционные методики решения задач обработки металлов давлением (ОМД), как правило, основаны на анализе упрощенных двумерных моделей процесса пластического деформирования металла. Практические возможности таких аналитических методов достаточно ограничены из-за принятых гипотез и допущений. В то же время решение ряда практических вопросов технологии ОМД требует более полной и достоверной информации о напряженно-деформированном состоянии металла по сравнению с той, что дают аналитические двумерные модели. Переход к объемным задачам обработки металлов давлением с учетом реальных механических свойств металла возможен только на основе использования современных численных методов анализа.

В работах, опубликованных еще в 1975-1985 гг. [34-36] было показано, что наиболее эффективным методом решения технологических задач обработки металлов давлением является метод конечных элементов (МКЭ) [37,38], однако применение его в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, характерных для того времени, сводилось, как правило, к рассмотрению упрощенных плоских моделей.

Современное развитие информационных технологий и стремительный рост вычислительных ресурсов персональных компьютеров (ПК), разработка мощных графических средств трехмерного твердотельного моделирования в сочетании с появлением недорогих высокопроизводительных персональных компьютеров коренным образом изменили ситуацию. Ши-

рокому кругу пользователей стали доступны ПК – ориентированные версии мощных программных комплексов МКЭ-анализа.

Развитие вычислительных методов решения дифференциальных уравнений, опирающихся на огромные вычислительные ресурсы современных ЭВМ, позволяет решать эти уравнения для каждой конкретно заданных условий. В этом случае рассматриваются деформации и связанные с ними возникающие напряжения в отдельных исчезающе малых элементах объемного тела.

Разработанный метод, названный методом конечного элемента (МКЭ), исключительно эффективен при решении задач обработки давлением, в том числе и при рассмотрении объемных задач теории прокатки [37, 38].

В виде краткой справки можно дать общий подход к решению задач, реализованный в методе МКЭ. Математической основой является механика деформации тела, разделенного на параллелепипеды (или иные элементы) с их дальнейшим разделением на тетраэдры с узлами в их вершинах. Вектор узловых перемещений n -го тетраэдра содержит 12 компонент перемещений по 3 (u_x, u_y, u_z) в каждом узле i, j, m, l .

Перемещения внутри тетраэдра аппроксимируются линейным полиномом $\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z$.

Переход к цилиндрическим координатам вполне возможен, считая $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$. Коэффициенты $\alpha_1 \dots \alpha_4$ определяются из системы 4^х уравнений из общей зависимости для φ путем подстановки в них координат узлов и соответствующих им узловых перемещений

$$\begin{cases} \varphi_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 z_i \\ \varphi_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 z_j \\ \varphi_m = \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m + \alpha_4 z_m \\ \varphi_l = \alpha_1 + \alpha_2 x_l + \alpha_3 y_l + \alpha_4 z_l \end{cases}$$

В матричном виде $\varphi = N_i \varphi_i + N_j \varphi_j + N_m \varphi_m + N_l \varphi_l = [N] \{\varphi\}$

где $\{\varphi\} = \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_j \\ \varphi_m \\ \varphi_l \end{Bmatrix}$ - вектор узловых перемещений

$[N] = [N_i \ N_j \ N_m \ N_l]$ - матрица функций формы, которые имеют вид

$$N_\rho = \frac{1}{6V} (a_\rho + b_\rho x + c_\rho y + d_\rho z), (\rho = i, j, m, l)$$

коэффициенты - $a_\rho, b_\rho, c_\rho, d_\rho$ - определяются через координаты узлов

$$a_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_m & y_m & z_m \\ x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad b_i = - \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_m & z_m \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix}$$

$$c_i = \begin{vmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_m & z_m \\ 1 & x_l & z_l \end{vmatrix} \quad d_i = - \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_l & y_l \end{vmatrix}$$

Остальные коэффициенты получают циклической перестановкой индексов

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad - \text{объем тетраэдра } i j m l$$

Поскольку $\varphi = [N] \{\varphi\}$, то полный вектор приращений узловых перемещений n -го тетраэдра имеет вид:

$$\{\Delta v\}^n = \begin{Bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \\ \Delta U_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_l & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_l & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \\ \Delta U_z \\ \Delta U_{xy} \\ \Delta U_{yz} \\ \Delta U_{xm} \\ \Delta U_{ym} \\ \Delta U_{zm} \\ \Delta U_{xl} \\ \Delta U_{yl} \\ \Delta U_{zl} \end{Bmatrix}$$

Вектор приращения n -го тетраэдра имеет вид:

$\{\Delta \varepsilon\}^n = [B]\{\Delta U\}^n$, где матрица $[B]$ получена дифференцированием предыдущего выражения по пространственным координатам, и с учетом $N\rho$

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_m & 0 & 0 & b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_m & 0 & 0 & c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_m & 0 & 0 & d_l \\ c_i & b_i & 0 & c_j & b_j & 0 & c_m & b_m & 0 & c_l & b_l & 0 \\ d_i & 0 & b_i & d_j & 0 & b_j & d_m & 0 & b_m & d_l & 0 & b_l \\ 0 & d_i & c_i & 0 & d_j & c_j & 0 & d_m & c_m & 0 & d_l & c_l \end{bmatrix}$$

Вектор приращения напряжений n -го элемента

$$\{\Delta \sigma\}^n = \begin{cases} [D]\{\Delta \varepsilon\}^n & \text{- для упругих элементов} \\ [D_\rho]\{\Delta \varepsilon\}^n & \text{- для пластичных элементов} \end{cases}$$

где $[D]$ и $[D_\rho]$ – соответственно упругая и упруго-пластическая матрицы.

Верхнее выражение – это закон Гука, нижнее – отражает упрочнение при пластической деформации.

Система разрешающих уравнений для определения полного вектора приращений узловых перемещений на каждом шаге нагружения имеет вид

$$[K]\{\Delta V\} = \{\Delta F\}, \text{ где } \Delta F \text{ – вектор приращения нагрузки:}$$

$[K] = \sum_{n=1}^M [K]^n$ - полная матрица жесткости, равная сумме подматриц для каждого элемента, которые определяются как

$$[K]^n = \begin{cases} [B]^T [D] [B] V & \text{- для упругих элементов;} \\ [B]^T [D_p] [B] V & \text{- для пластических элементов.} \end{cases}$$

T - символ транспонирования матриц.

Зная полный вектор приращения узловых перемещений, определяются приращения деформаций и напряжений каждого элемента.

Текущее значение деформаций и напряжений каждого элемента на q -м шаге нагружения определяются как

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\}_q &= \{\varepsilon\}_{q-1} + \{\Delta\varepsilon\}_q \\ \{\sigma\}_q &= \{\sigma\}_{q-1} + \{\Delta\sigma\}_q \end{aligned}$$

Приведение упругих элементов к пластическому состоянию осуществляется с помощью коэффициента приведения β , которое определяется для каждого элемента следующим соотношением

$$\sigma'_u = \sigma_T$$

где σ_T - текущее значение сопротивления деформации металла с учетом упрочнения и разупрочнения;

σ'_u - интенсивность напряжений элемента, приводимого к пластическому состоянию.

Для трехмерной задачи

$$\sigma'_u = \frac{1}{2} \sqrt{[(\sigma_x + \beta\Delta\sigma_x) - (\sigma_y + \beta\Delta\sigma_y)]^2 + [(\sigma_y + \beta\Delta\sigma_y) - (\sigma_x + \beta\Delta\sigma_x)]^2 + [(\sigma_z + \beta\Delta\sigma_z) - (\sigma_x + \beta\Delta\sigma_x)]^2 + 6(\tau_{xy} + \beta\Delta\tau_{xy})^2 + 6(\tau_{yz} + \beta\Delta\tau_{yz})^2 + 6(\tau_{zx} + \beta\Delta\tau_{zx})^2};$$

Зная компоненты вектора напряжений, можно найти эквивалентные напряжения.

Суммирование соответствующих напряжений для контактных элементов на контактных поверхностях должно определить внешние нагрузки, возникающие от перемещений инструмента.

На внешних неконтактных поверхностях, где отсутствуют силы трения, проекции нормальных напряжений равны нулю, если нет действующих сил. При воздействии внешних сил проекции внутренних сил по границе равны проекциям распределенных внешних сил. Этим выполняются граничные условия интегрирования уравнений равновесия.

Подобная схема вычислительного процесса выполняется программным пакетом ANSYS, используемым в научно-исследовательской работе и учебном процессе на кафедре «Оборудование и технологии прокатки» МГТУ им. Н.Э.Баумана. На основе использования пакета ANSYS авторами было выполнено МКЭ – моделирование процесса поперечной прокатки на стане ПВП 20-60 [26].

Описание задачи и исходные данные для расчета.

Конструкция стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 предусматривает возможность прокатки как по трех-, так и по двухвалковой схеме [26]. Целью исследования был сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния заготовки и энергетических параметров процесса прокатки для указанных технологических схем. Моделировалась холодная поперечно-винтовая прокатка сплошной цилиндрической заготовки с диаметра $D=120$ мм на диаметр $d=90$ мм в 2-х и 3-х валках для следующих случаев:

1. Прокатка с задним подпором. Сила подпора в соответствии с технической характеристикой стана ПВП 20-60 принята равной $T_b=120$ кН [26].

2. Прокатка с передним натяжением. Сила натяжения в соответствии с характеристикой стана $T_f=80$ кН.

3. Прокатка одновременно с подпором $T_b=120$ кН и натяжением $T_f=80$ кН.

Материал заготовки – медь М0. Механические характеристики материала: предел текучести $\sigma_T=120$ МПа; модуль упругости 1-го рода $E=10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu=0,31$; плотность $\rho=8100$ кг/м³. При рассмотрении пластической деформации принята билинейная изотропная характеристика упрочнения материала заготовки, представленная на рис. Модуль упрочнения $E_y=50$ МПа [39]. Коэффициент трения в контакте «заготовка – валок» принят равным $\mu=0,27$

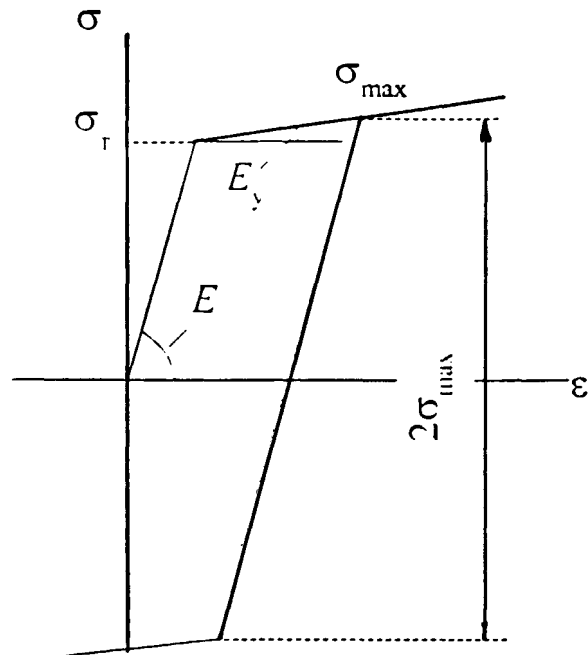


Рис. 45 Характеристика билинейного изотропного упрочнения материала заготовки.

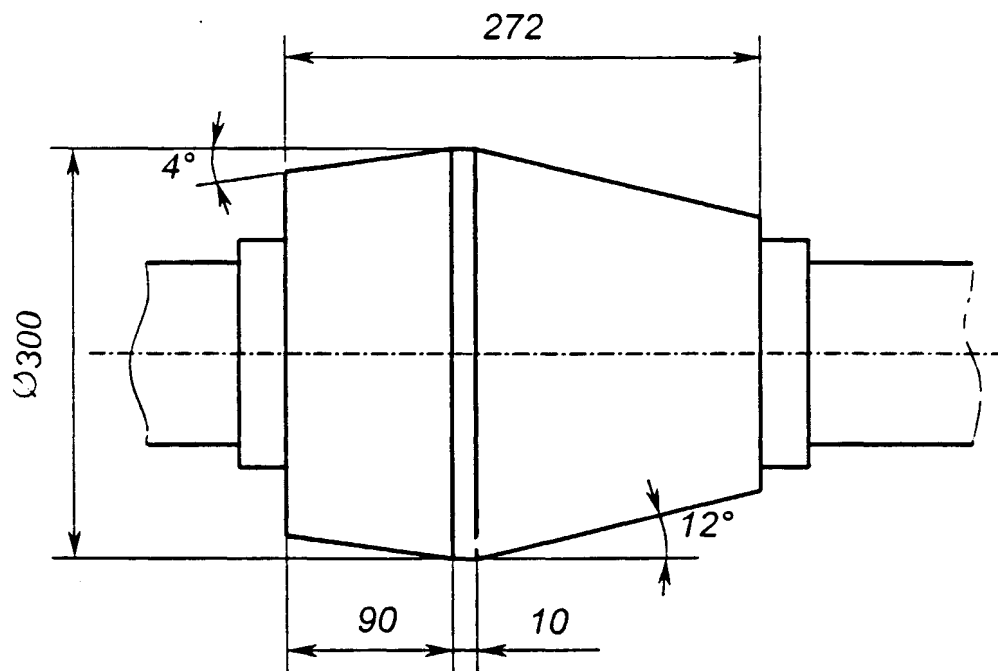


Рис. 46 Калибровка рабочего валка стана ПВП 20-60.

Прокатка ведется в валках с безребневой калибровкой, устанавливаемых без тангенциального смещения [26]. Калибровка рабочего валка представлена на рис. 46. Угол раскатки в расчетах был принят равным 0

градусов. угол подачи - 9 градусов.

Основные допущения.

Моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки проводилось в среде конечно-элементного пакета ANSYS 5.6.2. со следующими допущениями:

- принимаются изотермические условия деформации. т.е. разогрев деформируемого материала и валков не рассматривается:

- прокатка считается холодной (температура металла ниже температуры рекристаллизации) и принимается, что сопротивление деформации не зависит от скорости деформации:

- принимается, что трение на всей поверхности контакта подчиняется закону сухого трения Кулона, причем коэффициент трения постоянен на всей контактной поверхности:

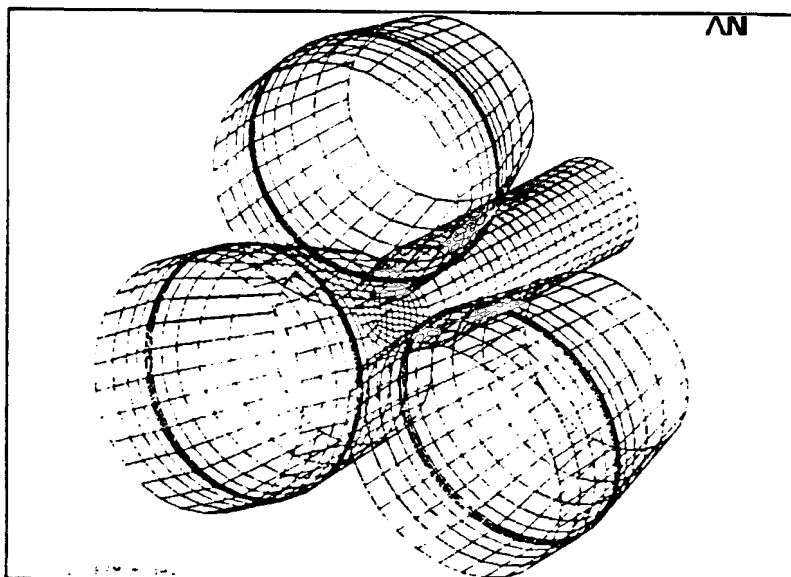
- валки прокатного стана рассматриваются как абсолютно жесткие тела:

- для обеспечения гарантированного захвата заготовки ее передняя часть выполнена конической.

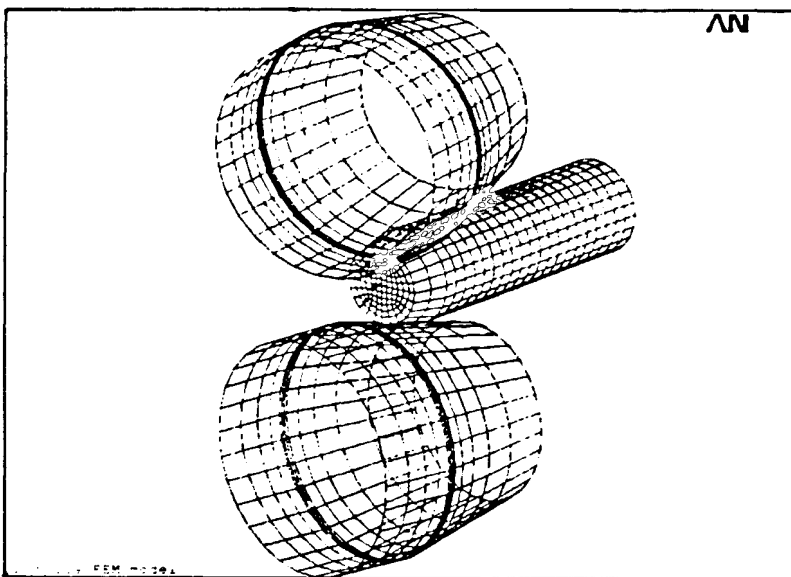
Конечно-элементные модели процессов и граничные условия, принятые в расчете.

На рис. 47 представлены конечно-элементные модели процессов прокатки в трех- и двух валках. Модель заготовки формируется из трехмерных твердотельных гексаэдрических элементов с упруго-пластическими свойствами. Прокатные валки моделируются абсолютно жесткими оболочечными элементами, расположенными на наружных поверхностях валков, контактирующих с прокатываемым металлом.

Общее число конечных элементов в трехвалковой модели - 3456, число узлов - 3953. Двухвалковая модель состоит, соответственно, из 3096 элементов и 3563 узлов.



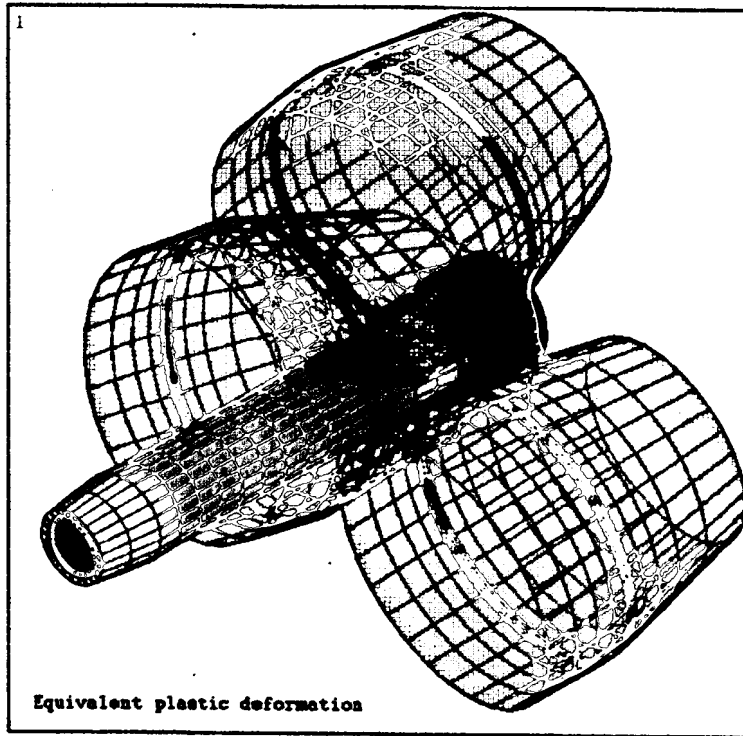
а



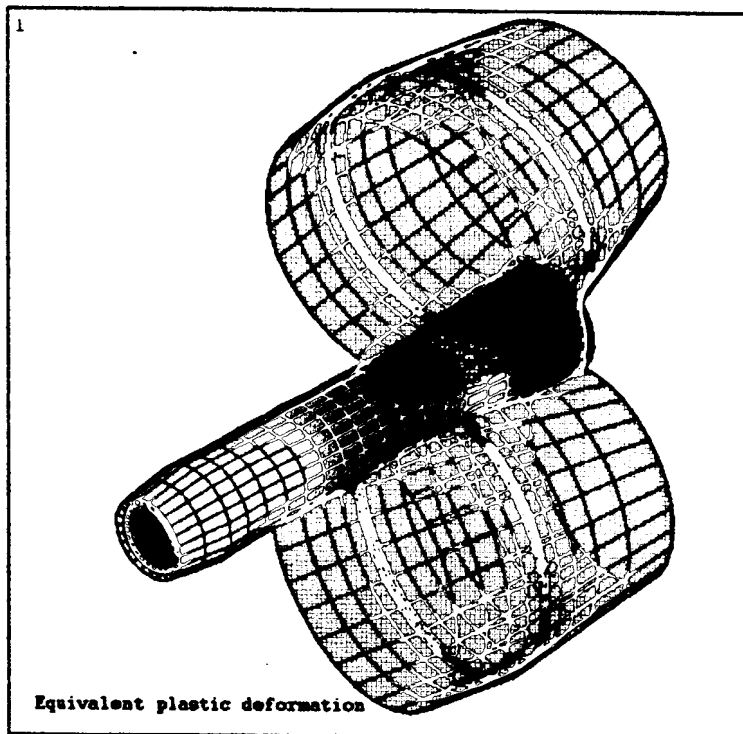
б

Рис. 47 Исходные конечно-элементные модели процесса поперечно-винтовой прокатки в трех (а) и двух (б) валках.

В качестве глобальной системы координат принята правая декартова система, ось Z , которой совпадает с продольной осью заготовки и направлена в сторону выхода металла из валков. Ось Y направлена вертикально вверх и совпадает с вертикальной осью барабана верхнего валка стана [26].



a)



б)

Рис. 48 Деформированный контур заготовки и распределение эквивалентной пластической деформации ϵ_{ep} при прокатке с подпором в 3-х (а) и 2-х (б) валках

Независимой переменной в модели является время, изменяющееся в процессе решения пределов от 0 до t с некоторым малым шагом интегрирования dt . При этом на каждом шаге интегрирования рабочие валки получают приращения по углу поворота вокруг своей оси $d\phi = \omega dt$, где ω - угловая скорость вращения валков. Принято, что рабочие валки вращаются с постоянной скоростью 60 об/мин. [26]. Таким образом, интервал времени в одну секунду в результатах решения соответствует одному обороту валков.

Сила подпора T_z и натяжения T_r прикладываются в виде распределенной нагрузки к узлам конечно-элементной сетки, расположенным на поверхностях заднего и переднего торцов заготовки соответственно. Для стабилизации пространственного положения заготовки в процессе решения центральному узлу конечно-элементной сетки на заднем торце заготовки запрещены перемещения по осям X и Y .

Расчеты выполнялись на ПК с процессором Pentium-III 500 с объемом оперативной памяти 256 Мбайт в среде операционной системы Windows NT. Время выполнения расчета по одному варианту при верхнем пределе интервала интегрирования $t = 3.6$ с, составляла в среднем около 12 часов.

Обработка результатов моделирования выполнена с помощью графического постпроцессора ANSYS. Результаты представлены в виде полей распределения напряжений и деформаций по поверхности и во внутренних сечениях заготовки для различных моментов времени. При этом приняты следующие обозначения:

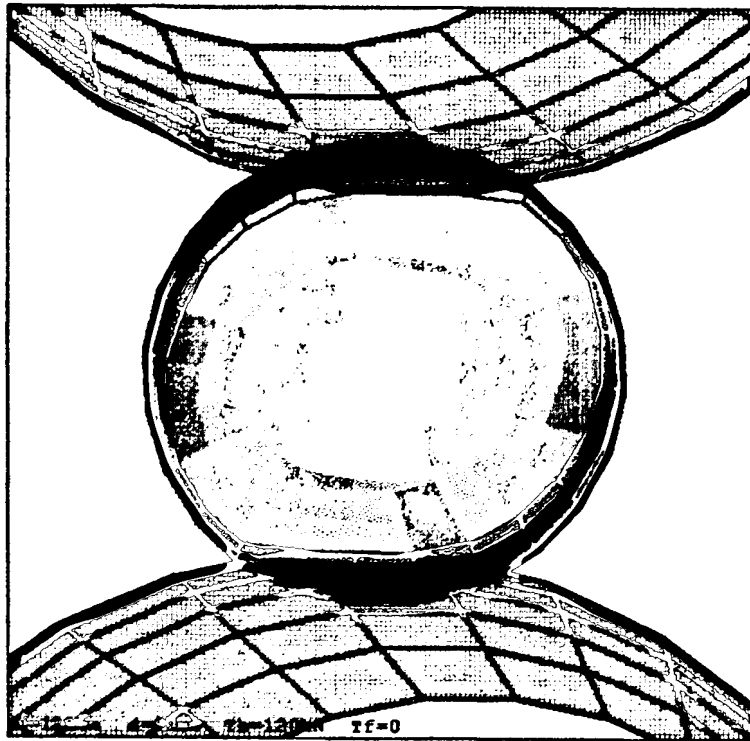
σ_e - эквивалентные напряжения по Мизесу;

σ_z - напряжения, действующие вдоль продольной оси заготовки (по оси Z);

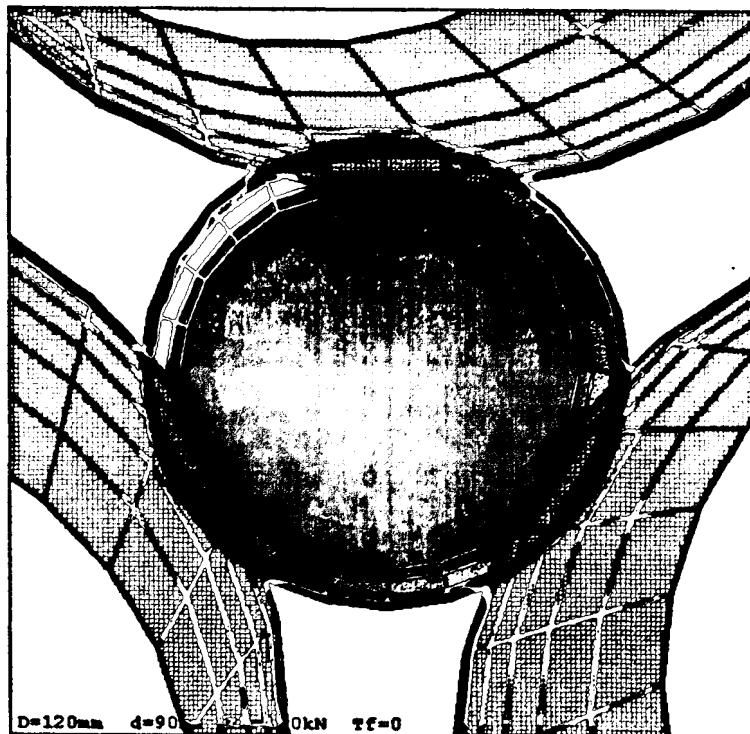
σ_r - напряжения, действующие по радиусу заготовки (радиальные напряжения);

ϵ_{ep} - эквивалентные пластические деформации по Мизесу.

Помимо параметров напряженно-деформированного состояния заготовки для оценки энергозатрат при прокатке выполнен расчет работы



a)



б)

Рис.49 Распределение эквивалентной пластической деформации ϵ_{ep} и форма поперечного сечения заготовки на выходе из зоны максимального обжатия: а – при прокатке в 2-х валках; б – при прокатке в 3-х валках

внешних сил и мощности прокатки.

На рис. 48 представлен деформированный контур заготовки и показана распределение эквивалентной пластической деформации при прокатке с подпором в момент времени $t=3$ с.

4.2. Анализ распределения напряжений при двух- и трехвалковой схемах прокатки с задним подпором силой 120 кН

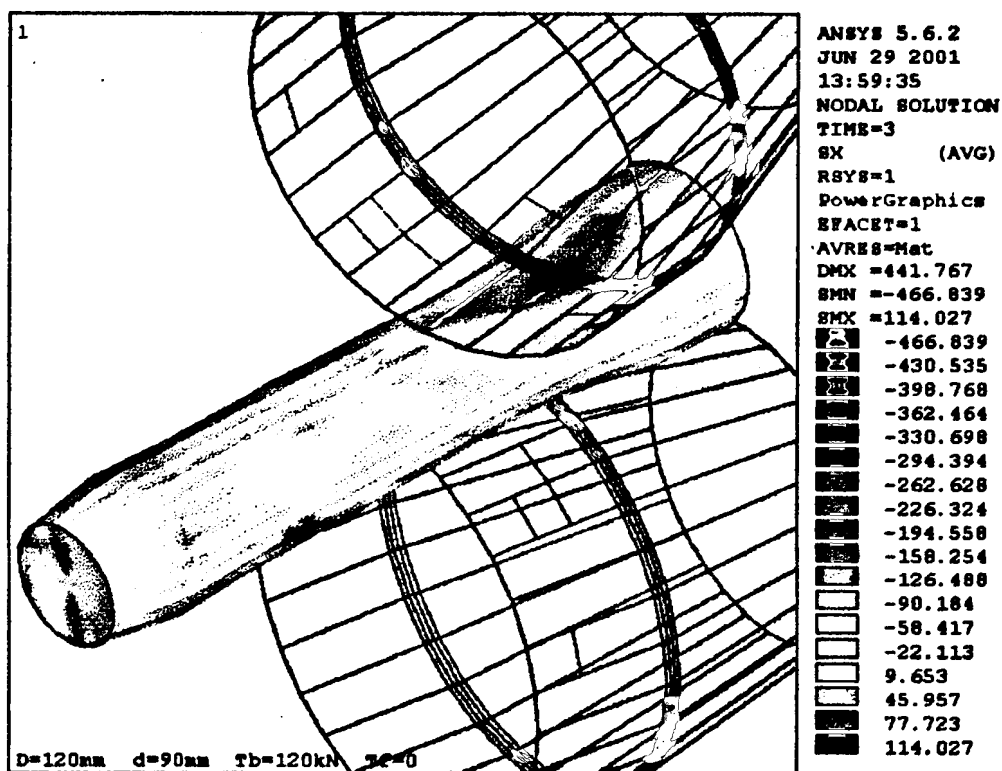
Сравнительный анализ распределения радиальных напряжений σ_r на поверхности заготовки на окончательной стадии прокатки ее (рис. 50) показывает следующее.

При двухвалковой схеме прокатки практически на всей поверхности заготовки (рис. 50 а) преобладают растягивающие радиальные напряжения, колеблющиеся от их максимального значения $\sigma_{r \max \text{ раст}} = 114$ МПа до их минимального $\sigma_{r \min \text{ раст}} = 9,653$ МПа, и чередующиеся с одновременным наличием радиальных напряжений сжатия в пределах $\sigma_{r \max \text{ сжат}} = -58,4$ МПа до $\sigma_{r \min \text{ сжат}} = -22,1$ МПа. В очаге деформации заготовки имеет место участок с ярко выраженными радиальными напряжениями сжатия (зона максимальных радиальных напряжений сжатия), колеблющимися в пределах $\sigma_{r \max \text{ сжат}} = -466,8$ МПа до $\sigma_{r \min \text{ сжат}} = -158,25$ МПа.

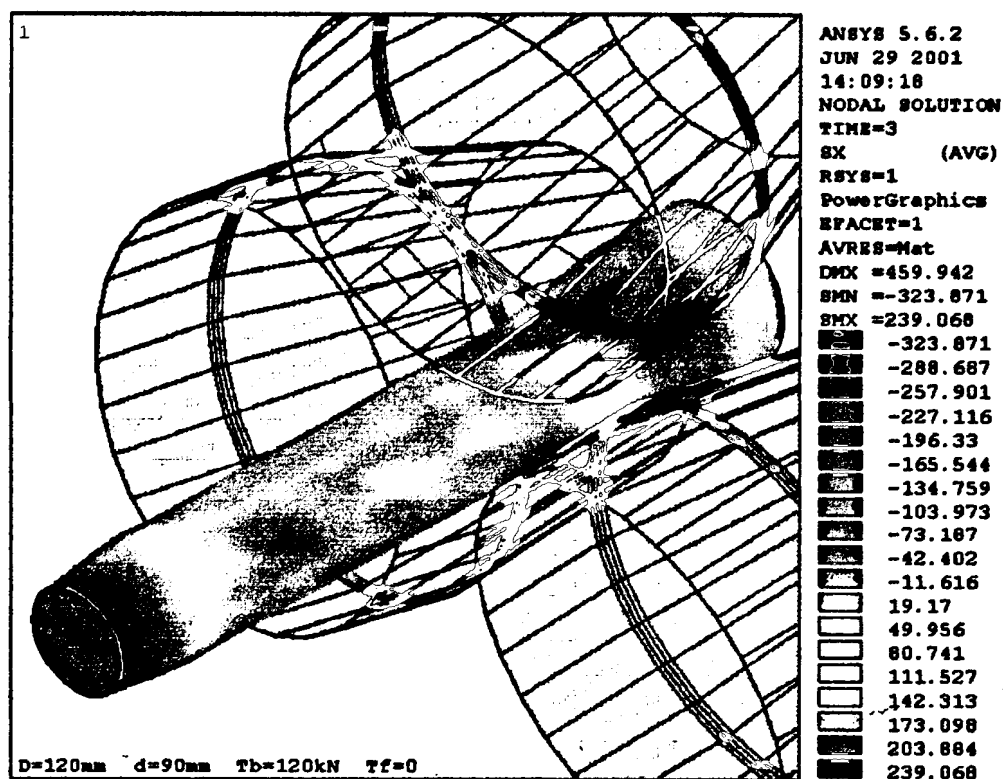
На переднем торце заготовки, прокатанной по двухвалковой схеме четко обозначены участки одновременного наличия как радиальных напряжений сжатия, так и радиальных напряжений растяжения, действие которых распространяется до центра заготовки, равных в абсолютных величинах $\sigma_{r \text{ сжат}} = -126$ МПа; $\sigma_{r \text{ раст}} = 114$ МПа.

Наличие двух участков в центре заготовки: радиальных напряжений сжатия и радиальных растягивающих напряжений примерно равных по своим абсолютным величинам, а значит и своему воздействию, предполагает в этой зоне заготовки (в центре ее) возникновения вскрытия полости ме-

Вариант 1. Прокатка с подпором силой 120 кН



a)



б)

Рис. 50 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) на поверхности заготовки при прокатке с подпором: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

талла.

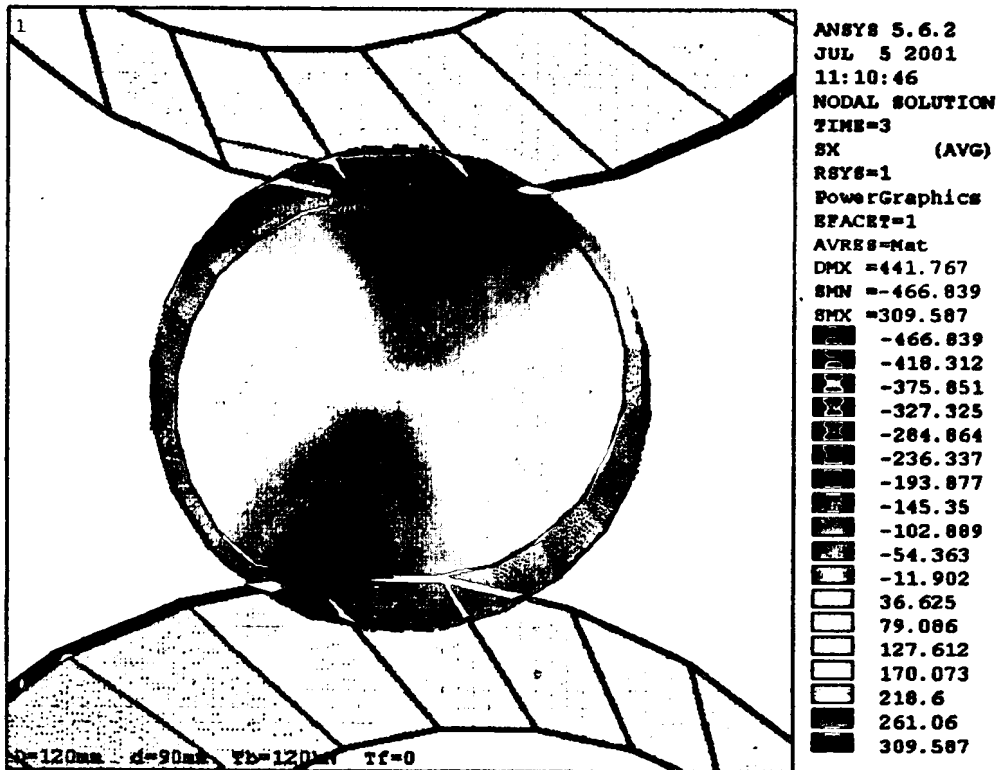
При трехвалковой схеме прокатки (рис. 50 б) той же заготовки при тех же условиях, т.е. с задним подпором силой $T_b=120$ кН, имеет место совершенно обратная картина.

По всей поверхности заготовки преобладающее значение имеют радиальные напряжения сжатия $\sigma_{г \text{ сжат}}$, колеблющиеся в очень незначительных пределах от $\sigma_{г \text{ max сжат}} = -134,7$ МПа до $\sigma_{г \text{ min сжат}} = -104$ МПа; одновременно на поверхности заготовки имеются отдельные фрагментарные, очень небольшие участки наличия радиальных напряжений растяжения $\sigma_{г \text{ раст}}$, которые в абсолютном выражении значительно ниже радиальных напряжений сжатия, равных в пределе $\sigma_{г \text{ раст}} = 49$ МПа.

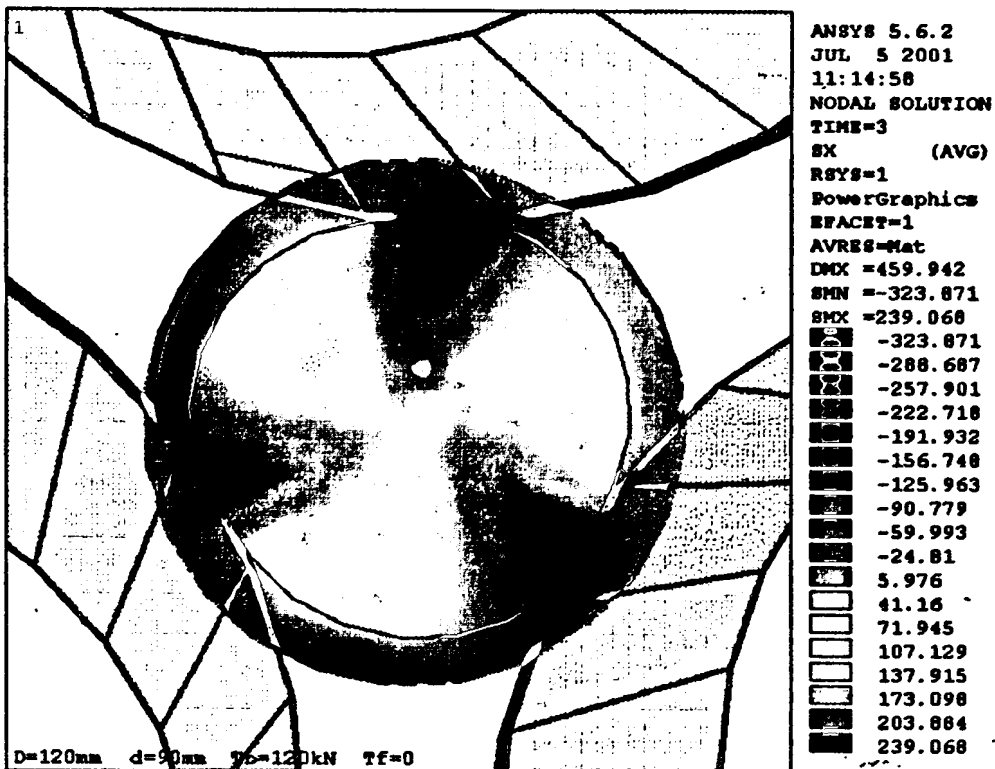
Очаг деформации представляет участок с гораздо большими радиальными напряжениями сжатия, но, по сравнению с двухвалковой схемой прокатки, эти радиальные напряжения сжатия (при трехвалковой схеме прокатки) значительно меньше по абсолютной величине $\sigma_{г \text{ сжат}} = -323,8$ МПа, вместо $\sigma_{г \text{ сжат}} = -466,8$ МПа при двухвалковой схеме и сам участок действия этих напряжений по площади в 2-3 раза меньше, чем при двухвалковой схеме прокатки.

На переднем торце заготовки прокатанной по трехвалковой схеме, полностью отсутствуют радиальные напряжения растяжения $\sigma_{г \text{ раст}}$, что предполагает значительно большую степень целостности металла в центре заготовки после ее прокатке по указанной трехвалковой схеме, нежели после прокатки на двухвалковой схеме.

Распределение радиальных напряжений σ_r при прокатке с подпором в зоне максимального обжатия заготовки, т.е. в сечении, перпендикулярном оси прокатки (заготовки) и совпадающим с сечением рабочих валков в месте их максимального диаметра (рис. 51) представляет следующее.



a)



b)

Рис. 51 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) в зоне максимального обжима заготовки при прокатке с подпором: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

При двухвалковой схеме прокатки заготовки в зоне максимального обжатия (рис. 51 а) (в перпендикулярном сечении к оси прокатки) существуют две зоны радиальных напряжений - зона радиальных напряжений сжатия, находящаяся непосредственно под воздействием двух рабочих валков и, которая состоит из двух равных, не соединенных между собой участков, и, значительно большая, нежели первая, - зона радиальных напряжений растяжения, представляющих собой два сектора по форме, соединенных между собой значительной центральной зоной (перемычкой). Максимальные значения радиальных напряжений сжатия находятся непосредственно в зоне контакта с рабочими валками и, примерно, равны $\sigma_{r \text{ max сжат}} = -466,8$ МПа, ближе к центру заготовки значения их резко снижаются и равны $\sigma_{r \text{ min сжат}} = -11,9$ МПа. Зоны воздействия максимальных значений сжимающих радиальных напряжений крайне незначительны, гораздо большую часть составляют зоны воздействия средних по значению ($\sigma_{r \text{ сжат}} = -140 \div -102$ МПа) и минимальных ($-54 \div -11$ МПа) радиальных напряжений сжатия.

По существу два разорванных между собой участка радиальных напряжений сжатия являются локальными, имеют форму двух, несоединенных друг с другом, секторов и занимают в суммарном выражении примерно 40% от всей площади сечения заготовки в зоне максимального ее обжатия.

Зона радиальных напряжений растяжения очерчена внешними частями контура прокатной заготовки, находящимися между рабочими валками с увеличением абсолютной величины этих напряжений к центру заготовки, где и имеют максимальную их величину в месте нахождения перемычки ($\sigma_{r \text{ max раст}} = 127,6$ МПа). Минимальная величина радиальных напряжений растяжения находится ближе к поверхности, свободной от рабочих валков, и составляет $\sigma_{r \text{ min раст}} = 36,6$ МПа. Разность между максимальными и минимальными значениями радиальных напряжений растяжения составляет 90 МПа, тогда как разность между максимальными и минимальными радиальными напряжениями сжатия составляет

$$\sigma_{r \text{ max сжат}} - \sigma_{r \text{ min сжат}} = (-466,8 \text{ МПа}) - (-11,9 \text{ МПа}) = -455 \text{ МПа},$$

что в несколько раз превышает разность между радиальными напряжениями растяжения. Эта разница и является главной причиной самих напряжений растяжения, больших по величине в центре, что, в свою очередь, и создает в центре заготовки предпосылки для вскрытия полости в металле.

Распределение радиальных напряжений σ_r при прокатке такой же заготовки по трехвалковой схеме (рис. 51 б) отличается в значительной степени от вышерассмотренной двухвалковой.

Во-первых, наличие трех рабочих валков приводит к возникновению не двух, а трех очагов максимальных радиальных напряжений сжатия по окружности заготовки, т.е. к большей дробности очагов напряжений, а значит, к большей степени равномерности их, и, меньшей по абсолютной их величине ($\sigma_{r \text{ max сжат}} = -323,8 \text{ МПа}$) вместо ($\sigma_{r \text{ max сжат}} = -466,8 \text{ МПа}$) при двухвалковой схеме прокатки.

Во-вторых, вместо двух секторов, в которых возникают радиальные напряжения сжатия и двух секторов с радиальными напряжениями растяжения при двухвалковой схеме прокатки, появляются по три чередующихся сектора с радиальными напряжениями сжатия и растяжения, значительно меньшими по площади воздействия и практически разорванными друг от друга в центре поперечного сечения заготовки, что способствует стабилизации системы равновесности металла по всей площади сечения и, особенно, в центре заготовки, т.к. при этом абсолютные величины разности между $\sigma_{r \text{ max сжат}} - \sigma_{r \text{ min сжат}}$ практически уравниваются такой же разностью (по абсолютной величине) между максимальными и минимальными радиальными напряжениями растяжения.

Прокатку заготовки по трехвалковой схеме с задним подпором силой $T_b=120 \text{ кН}$ с определенной степенью допущения можно рассматривать как деформацию металла при всестороннем сжатии, где рабочие валки создают сжимающие усилия P_x и P_y (три рабочие валка создают замкнутый сжи-

мающий контур), а усилием P_z является усилие заднего подпора T_b .

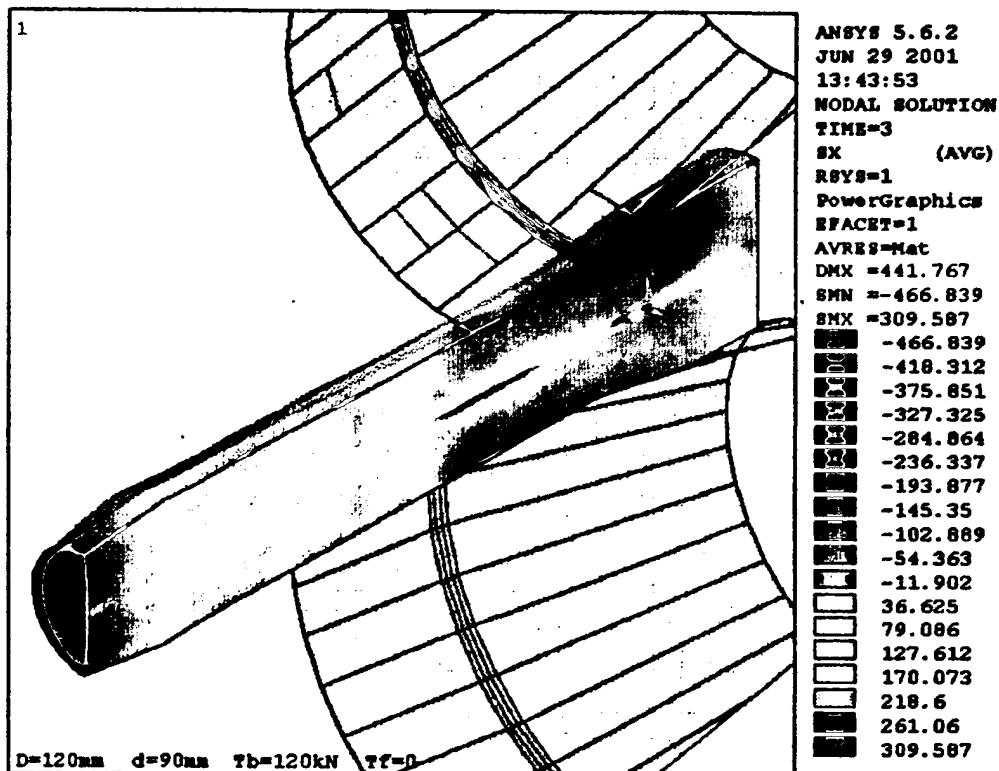
В этом случае схема всестороннего сжатия благоприятствует максимальной степени пластичности деформируемой заготовки.

Существенно различается между собой характер распределения радиальных напряжений в продольном (вертикальном) сечении заготовки при прокатке ее с подпором по двух- и трехвалковой схемам деформации (рис. 52).

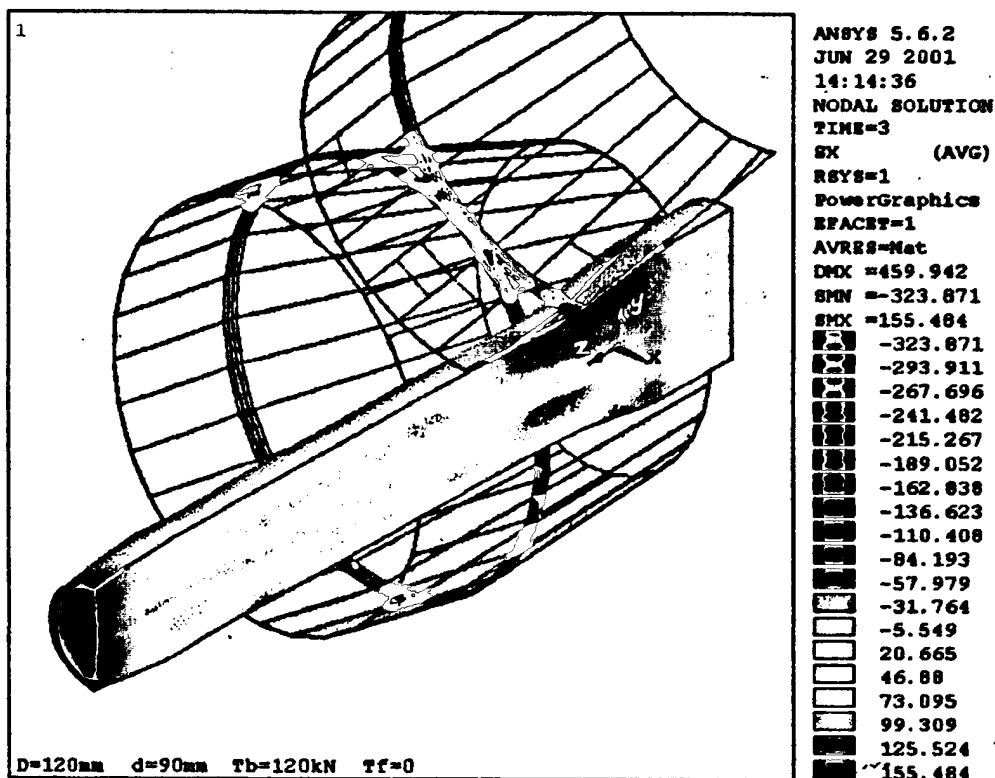
Главное, что характеризует распределение радиальных напряжений σ_r в этой плоскости при двухвалковой схеме прокатки (рис. 52) - это ярко выраженная зона действия максимальных по абсолютной величине радиальных напряжений растяжения σ_r , действующих строго по оси заготовки Z , т.е. в центральной ее части находящихся непосредственно в районе воздействия рабочих валков. По длине эта зона радиальных напряжений растяжения практически полностью соответствует длине контактной поверхности рабочих валков с заготовкой (ярко красный цвет). Максимальное значение этих радиальных напряжений растяжения составляет $\sigma_{r \max \text{ раст}} = 309,587$ МПа и находится на участке наибольшего обжатия заготовки.

В верхних и нижних зонах вертикальной плоскости продольного сечения, т.е. в местах контакта рабочих валков с заготовкой, находятся примерно такие же по длине зоны максимальных по абсолютной величине радиальные напряжения сжатия, где $\sigma_{r \max \text{ сжат}} = -466,8$ МПа, которые по мере приближения к центру заготовки резко уменьшаются по своей абсолютной величине и в районе, близком к оси заготовки, примерно равны $\sigma_{r \min \text{ сжат}} = -54,3$ МПа.

Причиной этого является неравномерность деформации заготовки в направлении от ее поверхности к центру, что и приводит к возникновению больших по абсолютному значению растягивающих радиальных напряжений в центре заготовки. По длине эта зона соответствует длине участка оч-



a)



б)

Рис. 52 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

га деформации, в остальной части продольного сечения заготовки, особенно в передней ее части, имеются радиальных напряжений растяжений в пределах $\sigma_{г\text{раст}} = 36,6 \div 79$ МПа.

При трехвалковой схеме прокатки заготовки характер распределения радиальных напряжений в продольном сечении совершенно иной (рис. 52 б). Как и в случае двухвалковой схемы прокатки, также имеет место зона максимальных радиальных напряжений растяжения в продольном вертикальном сечении, но, во-первых, она находится не по центру (оси) заготовки, а ближе к поверхности ее, во-вторых, она находится на частях поверхности заготовки, свободных от контактов с рабочими валками и, в-третьих, абсолютная величина максимальных радиальных напряжений растяжения при трехвалковой схеме равна $\sigma_{г\text{max раст}} = 155,48$ МПа, т.е. в 2 раза меньше, чем при двухвалковой схемы прокатки ($\sigma_{г\text{max раст}} = 309,6$ МПа).

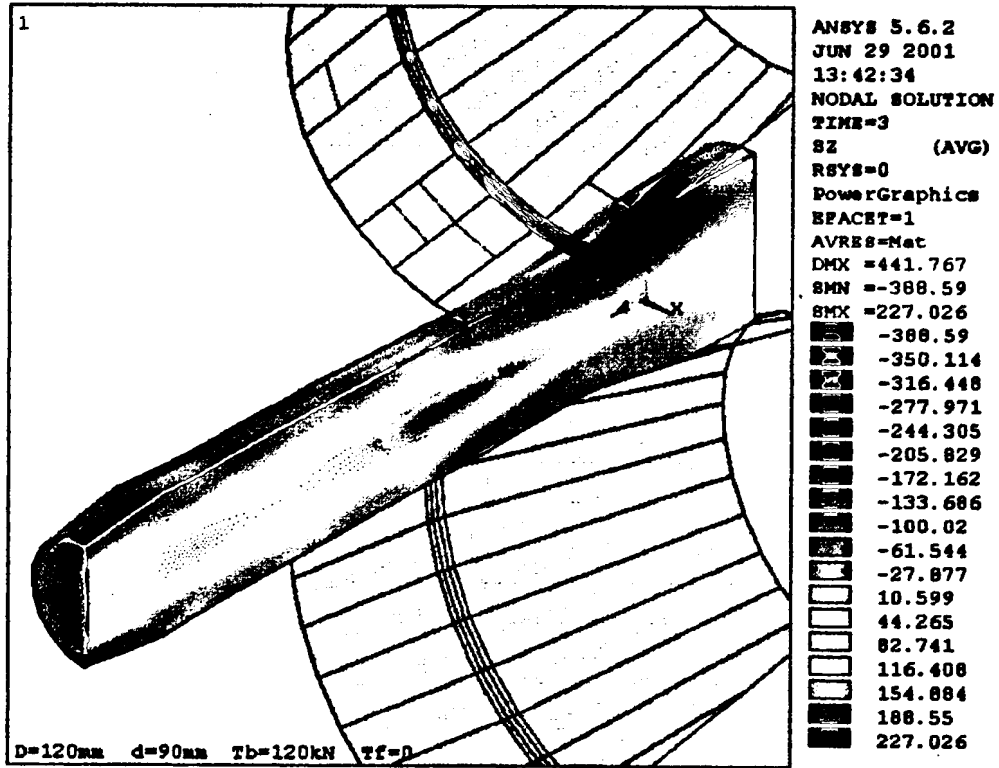
Это говорит о меньшей степени неравномерности деформации по сечениям, в т.ч. и в профильном сечении.

Как и при двухвалковой схеме прокатки, в продольном сечении, практически по всей его площади заготовки (прутка), также имеются локальные радиальные напряжения растяжения, но по своей абсолютной величине они значительно ниже ($\sigma_{г\text{min раст}} = 20,6$ МПа), чем при двухвалковой прокатке ($\sigma_{г\text{min раст}} = 36 \div 79$ МПа).

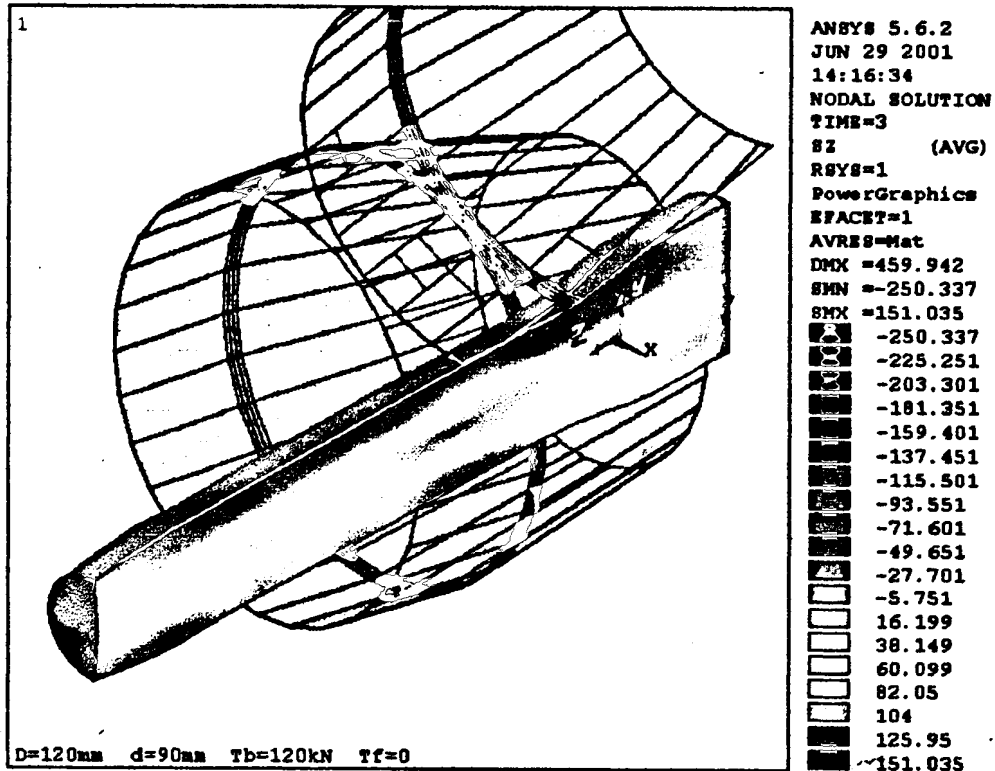
В передней части прокатанного прутка, начиная с переднего его торца, радиальные напряжения растяжения уже отсутствуют.

В создании условий возникновения и распределения осевых напряжений σ_z в продольном вертикальном сечении заготовки сила садного подпора ($T_b=120$ кН) при прокатке заготовки имеет особое значение.

В процессе поперечно-винтовой прокатки происходит уменьшение диаметра заготовки с большего на меньший, а также вращение заготовки, зависящее от вращения рабочих валков, и осевое ее перемещение вдоль оси



a)



б)

Рис. 53. Распределение осевых напряжений σ_z (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

прокатки.

Целостность заготовки и прокатного прутка, диаметры которых до деформирования и после него - не одинаковы, предполагает, согласно закону постоянства объемов перемещение одинаковых объемов в единицу времени до и после очага деформации. Именно поэтому, прокатанный пруток наименьшего диаметра должен перемещаться в осевой направлении с большей скоростью, нежели заготовка большего диаметра.

В связи с тем, что рабочие валки, перемещающие заготовку - пруток, имеют постоянную скорость вращения, увеличенная осевая составляющая перемещения прутка с меньшим диаметром возможна только при наличии эффекта проскальзывания прутка относительно рабочих валков, т.е. течение металла прутка после максимального его обжатия, возможна с опережением, особенно это касается наружных слоев прутка при отставании центральных внутренних слоев. Именно это, в конечном счете способствует и является главной причиной возникновения больших осевых растягивающих напряжений σ_z в продольном сечении заготовки - прутка, особенно в центральной ее части, что и отражено на рис. 53.

При двухвалковой схеме прокатки (рис. 53 а) осевые растягивающие напряжения $\sigma_{z \text{ раст}}$ сконцентрированы в центральной осевой части прокатного прутка, в виде объемного "столба" (вдоль оси прутка - заготовки), радиус которого примерно равен половине радиуса прокатного прутка (эта зона окрашена в ярко желтый цвет). Эта зона растягивающих осевых напряжений начинается от переднего конца - торца прокатного прутка и заканчивается в районе очага деформации. Эту зону можно условно назвать зоной "средних" растягивающих осевых напряжений, где напряжения колеблются в пределах $\sigma_{z \text{ раст ср}} = 44 \div 82$ МПа.

Другая ярко выраженная зона - зона действий максимальных осевых растягивающих напряжений небольшая по длине, и находится непосредственно в центральной части прутка под очагом деформации, в зоне макси-

мального обжатия заготовки рабочими валками. Этот участок окрашен в ярко красный цвет. Величина максимально растягивающих осевых напряжений здесь достигает величины $\sigma_{z \text{ max раст}} = 227$ МПа. Во всем остальном объеме металла прокатного прутка и недеформированной еще заготовки (ближе к поверхности), преобладают осевые напряжения сжатия $\sigma_{z \text{ сжат}} = -61,5 \div -100$ МПа (окрашена в зеленый цвет).

Прилагаемая к заднему концу заготовки внешняя сила подпора $T_b = 120$ кН усиливает эффект проскальзывания металла относительно рабочих валков и тем самым способствует возникновению еще в большей степени растягивающих осевых напряжений в центральном объеме прокатываемого прутка.

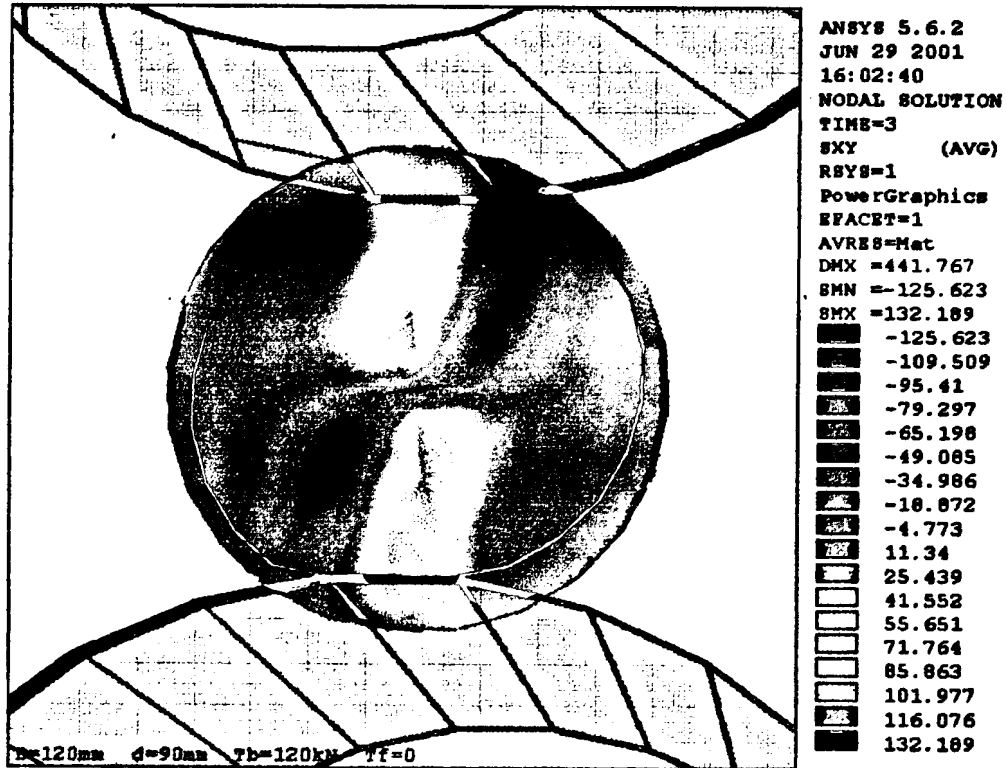
При трехвалковой схеме прокатки заготовки характер распределения осевых напряжений в продольной сечении в целом сходен с распределением осевых напряжений при прокатке на двухвалковой схеме, однако объем прутка - заготовки, по которому распределены осевые напряжения растяжения $\sigma_{z \text{ раст}}$, значительно меньший, а интенсивность их распределения гораздо ниже. Наибольшее значение осевых растягивающих напряжений достигает в районе очага деформации в этом варианте прокатки и составляет $\sigma_{z \text{ max раст}} = 104$ МПа, что более чем в два раза ниже максимальных растягивающих осевых напряжений при двухвалковой схеме прокатки $\sigma_{z \text{ max раст}} = 227$ МПа, а минимальная их величина составляет $\sigma_{z \text{ раст ср}} = 16 \div 38$ МПа. По остальному объему прутка заготовки равномерно распределены осевые напряжения сжатия с величинами $\sigma_{z \text{ сжат ср}} = -27,7 \div -71,6$ МПа, за исключением зоны с максимальными осевыми напряжениями сжатия, находящимися непосредственно в местах контакта заготовки с тремя рабочими валками, где их величина достигает максимальной величины $\sigma_{z \text{ max сжат}} = -159,4$ МПа.

Распределение касательных напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси Z ($\tau_{r\phi}$), в зоне максимального обжатия при прокатке с подпором (рис. 54) совершенно различно при прокатке по двух- и трехвалковой схемам. В дальнейшем примем, что касательным напряжениям приписываются знаки, которые показывают их совпадение с выбранным направлением координат (знак плюс) или противоположную направленность (знак минус).

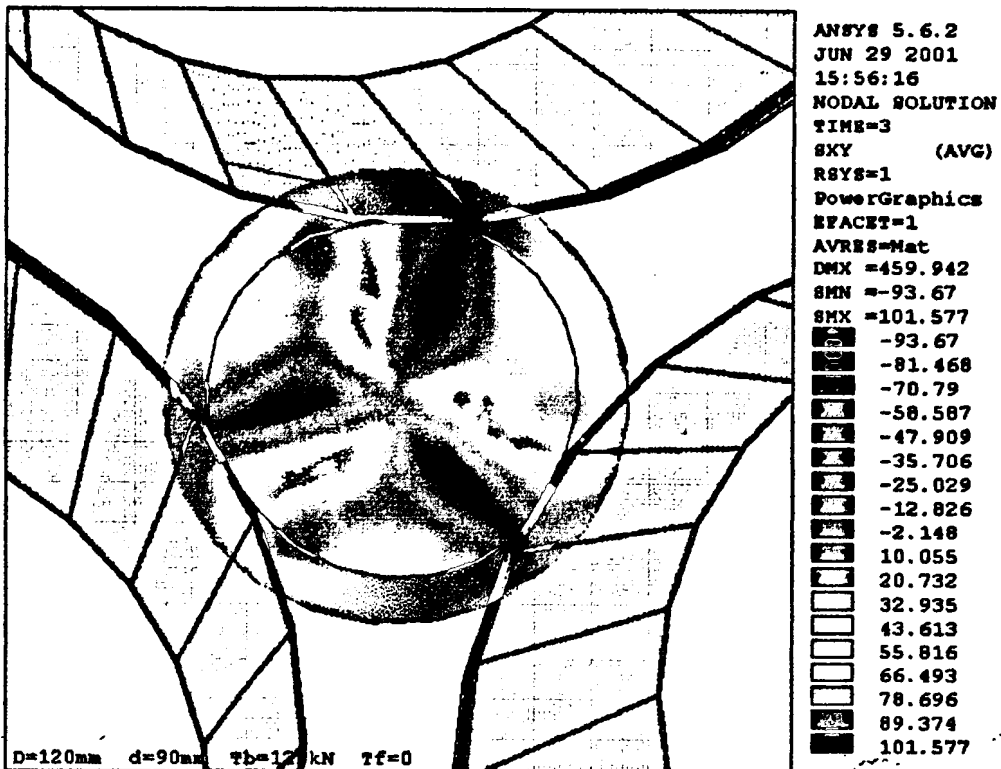
При двухвалковой схеме прокатки (рис. 54 а) вся площадь поперечного сечения заготовки в зоне максимального обжатия состоит из трех ярко выраженных зон:

- зона отрицательно направленных касательных напряжений (темно-фиолетовый и темно-синий цвет) $\tau_{r\phi}$, по форме представляющая собой два узких прямоугольника, соединенных между собой в центре сечения узкой перемычкой, каждый из которых другими своими концами достигает поверхности заготовки. В этой зоне касательные напряжения достигают значений $\tau_{r\phi} = -125,62$ МПа. Оба эти прямоугольника отстоят друг от друга на 180° ;

- зона положительно направленных касательных напряжений (ярко-желтый цвет с вкраплениями ярко-красного цвета) по форме аналогичная первой и расположенная практически параллельно ей. Максимальные значения этих напряжений достигают величины $\tau_{r\phi \max} = 132,18$ МПа. Эти прямоугольные участки также отстоят друг от друга примерно на 180° . Суммарно указанные выше две зоны действия касательных напряжений занимают менее половины общей площади поперечного сечения заготовки (примерно 35-40%). В очаге деформации наглядно просматривается область смены знака касательных напряжений, т.е. их направления. она выглядит в виде узкой зеленой полосы между первой и второй зонами, и в ней касательные напряжения отсутствуют. Эта область соответствует нейтральному сечению, разделяющему участки отставания и опережения течения металла



a)



б)

Рис. 54 Распределение касательных напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси Z $\tau_{r\phi}$ (МПа) в зоне максимального обжима при прокатке с подпором: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

в очаге деформации.

- третья зона занимает остальную площадь, где действуют небольшие по абсолютной величине касательные напряжения $\tau_{гф} = -18,8 \div 11,25$ МПа (зеленый цвет). Площадь этой зоны действия малых знакопеременных касательных напряжений занимает большую часть общей площади поперечного сечения заготовки и составляет примерно 60-65%.

При трехвалковой схеме прокатки заготовки с подпором $T_B=120$ кН (рис. 54 б) характер распределения касательных напряжений, действующих в плоскости перпендикулярной оси Z в зоне максимального обжатия заготовки рабочими валками, совершенно иной в сравнении с двухвалковой схемой прокатки. Общим признаком для обеих схем деформирования является то, что как в первом, так во втором случае вся площадь поперечного сечения заготовки состоит из трех зон: зоны действия положительно направленных касательных напряжений, зоны действия отрицательно направленных касательных напряжений и зоны действия, небольших по абсолютным величинам знакопеременных касательных напряжений.

Зона действия отрицательно направленных касательных напряжений представляет собой три отдельных, отстоящих друг от друга на 120° , узких участка площади сечения (темно-фиолетовый цвет), каждый из которых берет начало с поверхности заготовки в месте контакта с рабочими валками и распространяется к центральной осевой части заготовки с расширением площади воздействия касательных напряжений ближе к центру. Эти три участка касательных напряжений не соединяются в центральной осевой части заготовки, где они отсутствуют или близки к нулю. Значения напряжений на этих участках достигают $\tau_{гф} = -93,6$ МПа, что примерно на 25% меньше, чем при двухвалковой прокатке ($\tau_{гф} = -125,6$ МПа).

Зона действия положительно направленных касательных по рисунку и характеру их распределения в поперечном сечении заготовки идентична рассмотренной. Каждый из трех участков действия положительно направ-

ленных касательных напряжений на поверхности заготовки начинается в точке выхода заготовки из контакта ее с рабочими валками, тогда как участки с отрицательно направленными касательными напряжениями берут свое начало в точке входа заготовки в очаг деформации. Максимальные значения положительных касательных напряжений достигают $\tau_{гф} = 101,5$ МПа, что также меньше, чем при двухвалковой прокатке ($\tau_{гф} = 132,1$ МПа), и расположены они в центральных частях каждого из трех участков.

Обе зоны с максимальными касательными напряжениями располагаются практически параллельно друг другу, но на некотором расстоянии друг от друга (на поверхности заготовки это расстояние равно длине дуги контакта заготовки с рабочими валками). Часть поперечного сечения заготовки, находящаяся между зонами максимальных касательных напряжений, представляет собой третью зону – зону небольших по абсолютному значению касательных напряжений ($\tau_{гф} = -25,0 \div 32,9$ МПа). Общая площадь этой зоны примерно равна сумме площадей двух первых зон.

Сравнивая в целом характер распределения касательных напряжений по поперечному сечению заготовки, можно утверждать, что трехвалковая схема прокатки с подпором является более приемлемой схемой обработки по сравнению с двухвалковой прокаткой с такой же силой подпора.

4.3. Анализ распределения напряжений при двухвалковой и трехвалковой схем прокатки с натяжением усилием $T = 80$ кН

Напряженное состояние заготовки при прокатке с натяжением достаточно сложное и представляет собой суммарное напряженное состояние от воздействия следующих силовых факторов:

- давления рабочих валков на заготовку (обжатие) в очаге деформации, в результате которого в поперечном сечении заготовки возникают как радиальные напряжения сжатия $\sigma_{г сжат}$, так и радиальные напряжения растяже-

ния, возникающие вследствие неравномерности деформации по сечению заготовки - $\sigma_{r \text{ раст}}$;

- силы натяжения $T = 80$ кН, приложенной к переднему концу прокатываемого прутка. Эта сила является растягивающей для участка прутка от его переднего конца до сечения очага деформации с максимальным обжатием. В процессе прокатки длина этого участка постоянно увеличивается. Сила натяжения T вызывает в указанном объеме металла прокатанного прутка дополнительные осевые растягивающие напряжения ($\sigma_{z \text{ раст}}$) и оказывает влияние на величины радиальных напряжений σ_r , возникающих в поперечных сечениях заготовки, а также на поверхности прокатываемого прутка.

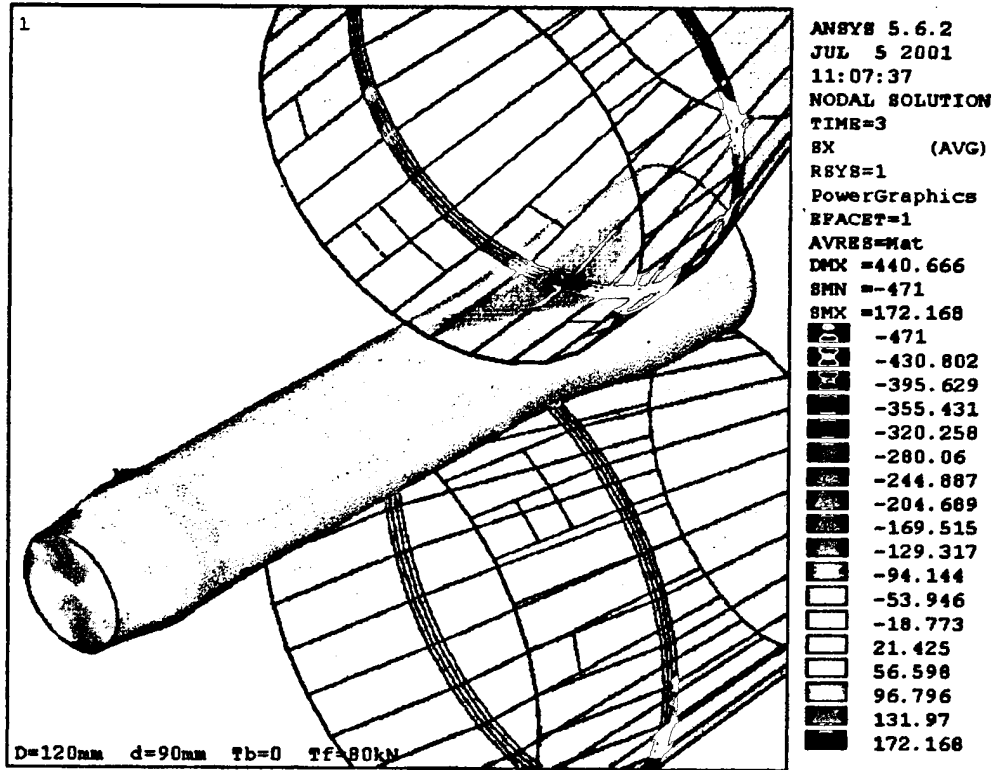
Процессы проскальзывания части объема металла прокатываемого прутка относительно рабочих валков или одних слоев металла относительно других согласно закону постоянства перемещения объемов металла в единицу времени, также являются причиной возникновения дополнительных растягивающих осевых напряжений σ_z в прутке.

На рис. 55 представлены компьютерные решения распределения радиальных напряжений σ_r на поверхности прокатываемой заготовки и дается их сравнительное представление для случая двухвалковой (рис. 55 а) и трехвалковой схем прокатки (рис. 55 б).

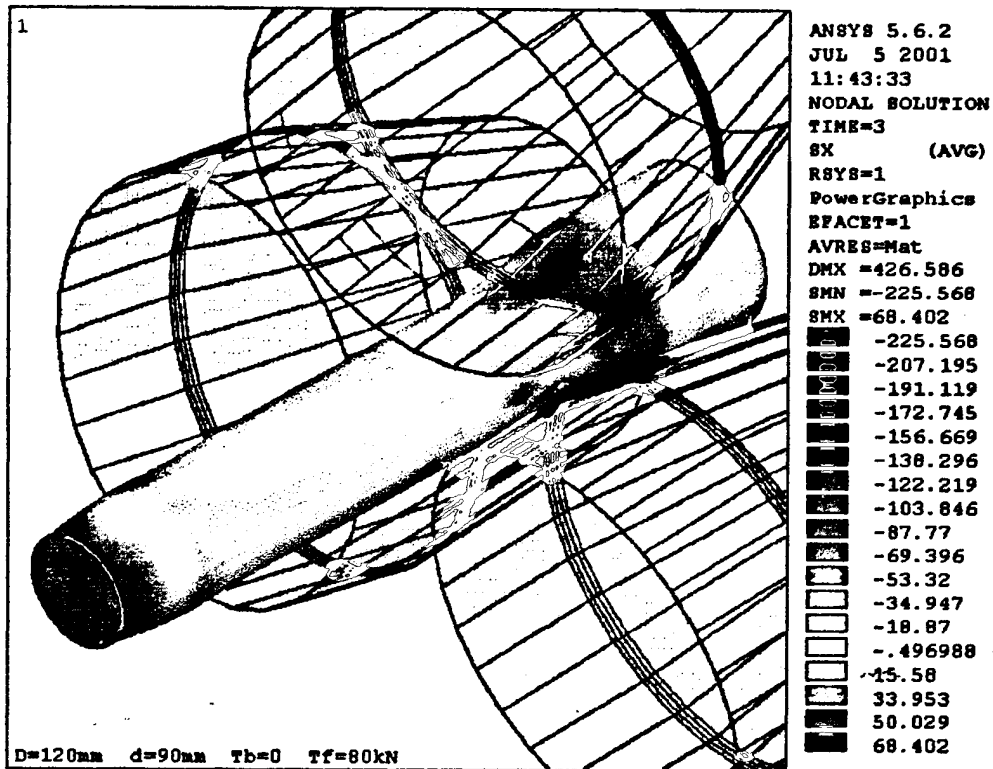
При двухвалковой схеме деформировании практически вся поверхность заготовки-прутка окрашена в светло-желтый цвет, что, согласно цветовой прилагаемой шкале, говорит об отсутствии радиальных напряжений в прокатанной заготовке.

Имеется, небольшая по площади, зона действия максимальных радиальных напряжений сжатия, которая ограничена параметрами очага деформации и находится непосредственно в местах контакта металла с рабочими валками, где $\sigma_{r \text{ max сжат}} = -430,8 \div -471$ МПа.

Вариант 2. Прокатка с натяжением силой 80 кН



a)



б)

Рис. 55 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) на поверхности заготовки при прокатке с натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

На поверхности прокатного прутка вне зоны контакта с рабочими валками при двухвалковой схеме прокатки наличествуют небольшие по абсолютной величине радиальные напряжения растяжения, причиной возникновения которых является неравномерность деформации поперечных сечений прутка, что достаточно наглядно показано и на переднем торце прутка.

Поверхность переднего конца прокатанного прутка небольшой длины окрашена в светло-зеленый цвет, что характеризуется распределением небольших по величине радиальных напряжений сжатия. Именно в этом месте и приложен к переднему концу прутка захватывающий тянущий механизм с силой натяжения $T = 80$ кН.

При трехвалковой прокатке (рис. 55 б) тенденция распределения радиальных напряжений на поверхности заготовки примерно такая же, как и при двухвалковой.

Однако имеются и определенные отличия напряженного состояния на отдельных участках заготовки.

Во-первых, в отличие от двухвалковой схемы зона поверхности, где находятся рабочие валки, не имеет различных окрасок, что говорит о том, что на всей поверхности заготовки в зоне деформации по всей окружности присутствуют только сжимающие радиальные напряжения $\sigma_{r \text{ сжат}}$. При этом наблюдается более равномерная деформация по сечению заготовки.

Во-вторых, абсолютные величины радиальных напряжений, как сжимающих, так и растягивающих, при трехвалковой схеме прокатки более чем в два раза меньше, чем при двухвалковой схеме прокатки.

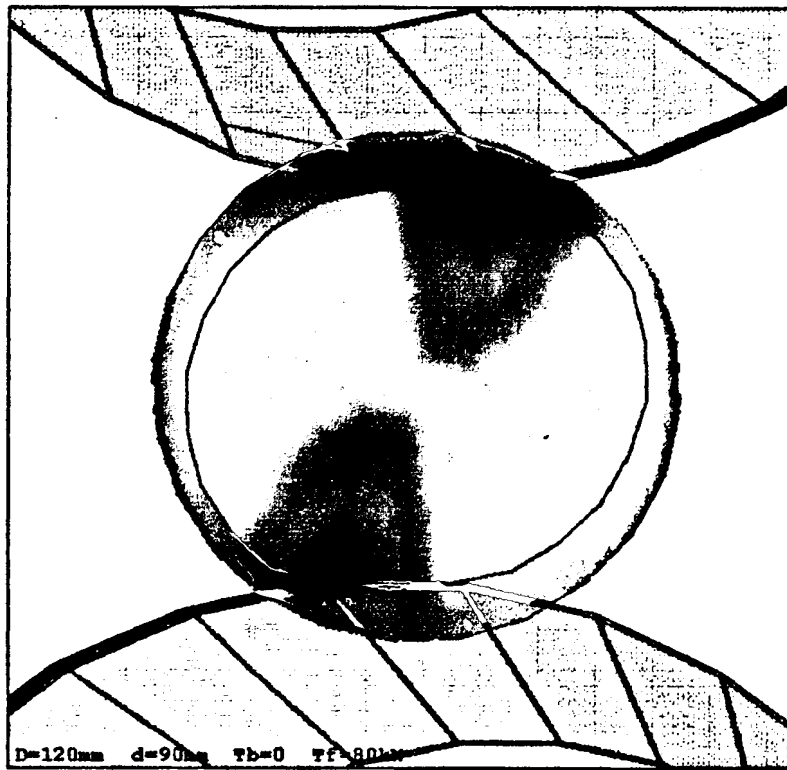
Сравнивая рис. 50 с рис. 55, т.е. распределение радиальных напряжений на поверхности заготовки при прокатке с подпором и при прокатке с натяжением (2-х и 3-х валковые схемы), можно отметить некоторые отличия напряженных состояний заготовок, особенно при трехвалковой схеме прокатки.

Как при прокатке заготовки с подпором (рис. 50 б), так и при прокатке с натяжением (рис. 55 б) на поверхности прокатанного прутка практически отсутствуют радиальные напряжения (зеленый цвет на рис. 50 б и желтый цвет на рис. 55 б). Исключение составляет передний конец заготовки, который вследствие своей конической формы был подвергнут меньшей деформации, что привело к возникновению остаточных напряжений на участке перехода от конуса к цилиндру.

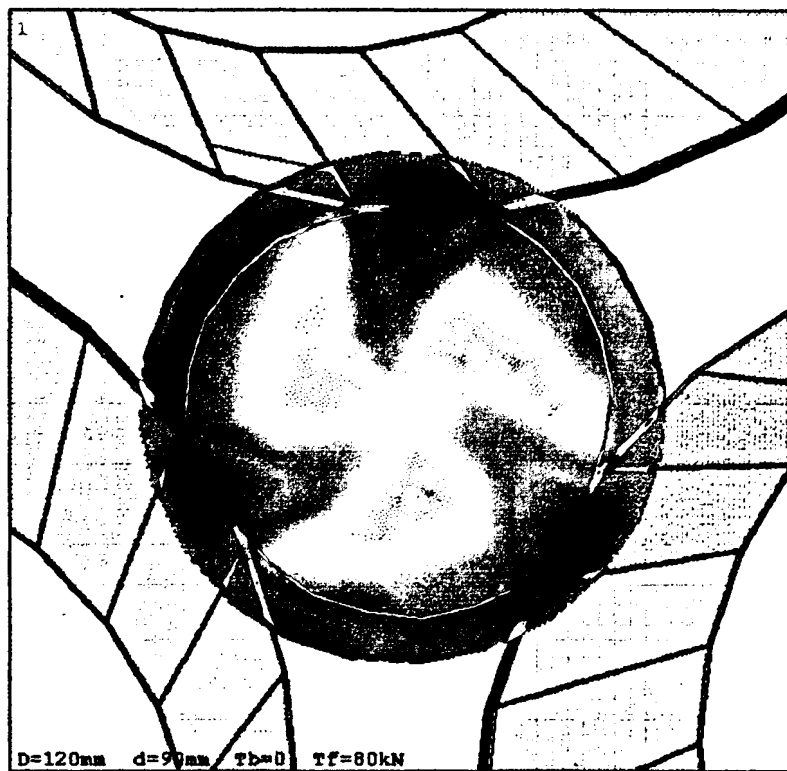
Сжимающие радиальные напряжения $\sigma_{r \text{ сжат}}$ на поверхности заготовки имеют место только в очаге деформации (в зоне влияния рабочих валков – максимальное их значение $\sigma_{r \text{ сжат}} = -225,5 \div -138,3$ МПа).

Сравнивая характер распределения радиальных напряжений по поверхности заготовки при двухвалковой схеме прокатки с подпором (рис. 50 а) и с натяжением (рис. 55 а), необходимо отметить наличие растягивающих напряжений на поверхности в сечении, перпендикулярном плоскости расположения валков. В случае прокатки с подпором (рис. 50 а) эти напряжения достигают 114 МПа, а при прокатке с натяжением (рис. 55 а) они уменьшаются до $60 \div 95$ МПа. Это можно объяснить тем, что значительные радиальные растягивающие напряжения, возникающие от неравномерности обжатий по сечению при двухвалковой схеме, «сглаживаются» при приложении дополнительного осевого усилия натяжения и поэтому радиальные растягивающие напряжения распределяются по поверхности заготовки более равномерно.

Анализируя распределение радиальных напряжений σ_r в сечении максимального обжатия заготовки, т.е в сечении, совпадающем с максимальным диаметром рабочих валков, при прокатке с натяжением (рис. 56), и, сравнивая распределение этих напряжений при прокатке с подпором (рис. 51) можно заметить существенные различия.



a)



б)

Рис. 56 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) в зоне максимального обжима заготовки при прокатке с натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

При прокатке заготовки по двухвалковой схеме деформации характер и рисунок распределения радиальных напряжений при прокатке с натяжением (рис. 56 а) практически повторяет характер и рисунок распределения напряжений при прокатке с подпором. Сжимающие радиальные напряжения в очагах деформации в обоих случаях имеют близкие значения (около 470 МПа).

В зоне максимальных растягивающих радиальных напряжений (в центре заготовки) σ_r при прокатке с натяжением почти в 1,6 раза больше, чем при прокатке с подпором (131 МПа по сравнению с 79 МПа). На поверхности заготовки растягивающие радиальные напряжения при прокатке с натяжением распределяются также, как и при прокатке с подпором, однако их абсолютная величина на свободном участке между валками значительно меньше (4,9 МПа), чем радиальные растягивающие напряжения в этом же сечении при прокатке с подпором (36,6 МПа).

Видимо здесь (при прокатке с натяжением) "сглаживающим" фактором является внешнее прилагаемое осевое натяжение $T = 80$ кН.

Существование более ярко выраженной центральной зоны растягивающих радиальных напряжений при прокатке с натяжением в виде ярко желтой перемычки ($\sigma_{r \text{ раст}} = 131$ МПа) говорит о том, что данная схема прокатки в большей степени, чем при прокатке с подпором, способствует вскрытию центральной полости заготовки.

При прокатке по трехвалковой схеме с передним натяжением заготовки распределение радиальных напряжений σ_r по сечению в зоне максимального обжатия (рис. 56 б) в значительной мере отличается от картины распределения напряжений при прокатке с подпором (рис. 51 б). В сечении также имеются ярко выраженные три зоны сжимающих радиальных напряжений с максимальным их значением в местах контакта заготовки с рабочими валками $\sigma_{r \text{ max сжат}} = -225,5$ МПа, что более чем в два раза меньше аналогичных сжимающих напряжений при прокатке с натяжением в двухвал-

ковой схеме, равных $\sigma_{r \max \text{ сжат}} = -471$ МПа (рис. 56 а), и в 1,5 раза ниже, чем сжимающие радиальные напряжения в таком же сечении при прокатке по трехвалковой схеме с подпором – $\sigma_{r \max \text{ сжат}} = -324$ МПа (рис. 51 б).

По мере приближения к центру заготовки сжимающие радиальные напряжения уменьшаются до $\sigma_{r \min \text{ сжат}} = -93,2 \div -49$ МПа. При этой схеме прокатки разность абсолютных величин между максимальными и минимальными значениями напряжений сжатия составляет

$\sigma_{r \max \text{ сжат}} - \sigma_{r \min \text{ сжат}} = -225,5 - (-49) = -176$ МПа, тогда как при прокатке с натяжением по двухвалковой схеме она составляет $471 - 81 = 390$ МПа, а при прокатке по трехвалковой схеме с подпором равняется $-324 - (-59) = -265$ МПа.

Меньшая разность по сечению заготовки сжимающих радиальных напряжений характеризует трехвалковый вариант прокатки как более благоприятный, приводящий к большей степени однородности деформации металла по сечению заготовки.

Характер распределения растягивающих радиальных напряжений, действующих в сечении максимального обжатия заготовки при прокатке с натяжением (рис. 56 б) по трехвалковой схеме отличается от предыдущих вариантов и схем некоторыми особенностями:

- во-первых, зоны действия растягивающих радиальных напряжений по форме 3-х секторов правильной формы (при подпоре рис. 51 б) превратились в локальные участки в форме 3-х небольших трапеций, не соединенных друг с другом (рис. 56 б);

- во-вторых, зоны действия растягивающих радиальных напряжений не распространяются до поверхности прокатанной заготовки, как это было при прокатке с подпором, а локализованы в зонах, находящихся от поверхности заготовки на расстоянии, равном примерно $1/3$ радиуса заготовки;

- в-третьих, абсолютные максимальные величины радиальных растягивающих напряжений $\sigma_{r \max \text{ раст}}$, возникающих при прокатке с натяжением со-

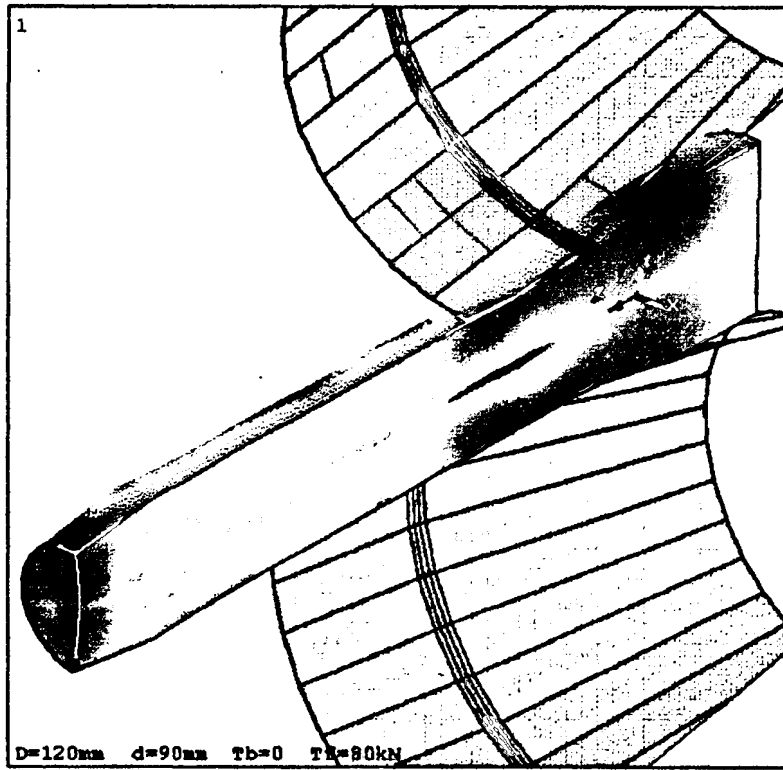
средоточены на меньших площадях и составляют примерно $\sigma_{r \text{ max раст}} = 106,8$ МПа, но эти зоны равно отдалены и от центральной части заготовки, и от ее поверхности.

Рассматривая характер распределения радиальных напряжений σ_r в продольном сечении при прокатке с натяжением, приложенным к переднему концу заготовки (рис. 57) и сравнивая эти результаты с результатами при прокатке с подпором (рис. 52) можно сделать следующие выводы.

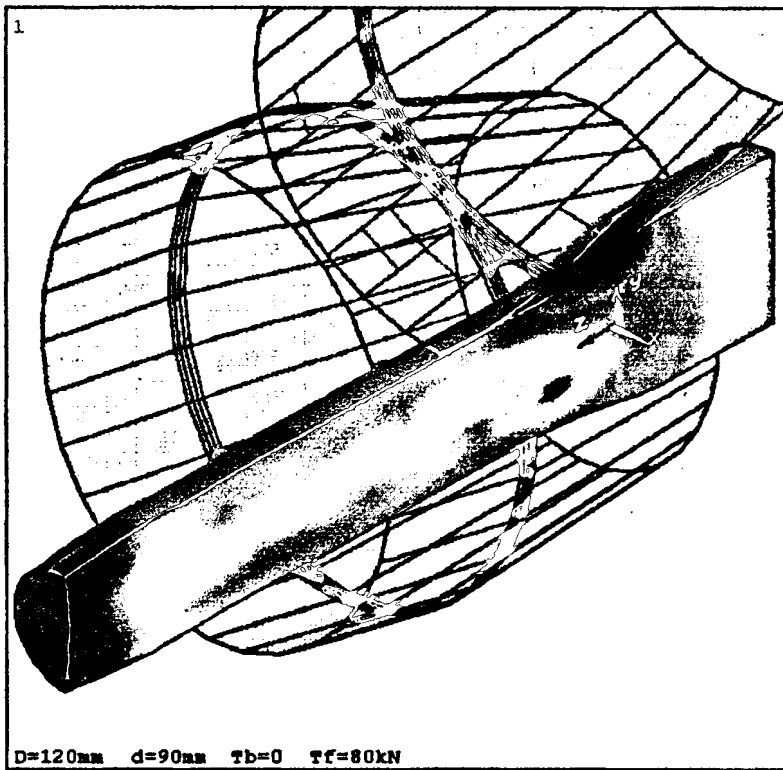
Характер распределения радиальных напряжений вне очага деформации при прокатке по двухвалковой схеме как с подпором (рис. 52 а), так и с натяжением (рис. 57 а) примерно одинаков. По оси заготовки имеются небольшие остаточные растягивающие радиальные напряжения $\sigma_{r \text{ раст}} = 36 \div 45$ МПа на общем фоне сжимающих радиальных напряжений $\sigma_{r \text{ сжат}} = -5 \div -40$ МПа по периферии сечения, т.е. имеет место равновесное состояние заготовки. В очаге деформации на выходе из зоны максимального обжатия по оси заготовки имеет место зона ярко выраженных максимальных растягивающих радиальных напряжений (260 МПа при прокатке с натяжением и более 300 МПа при прокатке с подпором). Эти напряжения обусловлены характером деформации при прокатке в 2-х валках.

При деформации по трехвалковой схеме с подпором и с натяжением (рис. 52 б, 57 б) в прокатанной части заготовки также наблюдаются остаточные радиальные напряжения – растягивающие в центральной части и сжимающие по периферии. Уровень этих напряжений примерно такой же, как и при двухвалковой прокатке, что объясняется одинаковой степенью деформации заготовки во всех рассматриваемых случаях.

При прокатке в трех валках с подпором в очаге деформации имеется небольшой участок максимальных растягивающих радиальных напряжений $\sigma_{r \text{ max раст}} = 155,4$ МПа, смещенный относительно зоны максимального обжатия в сторону выхода металла и представляющий собой три области. Эти



a)



b)

Рис. 57. Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

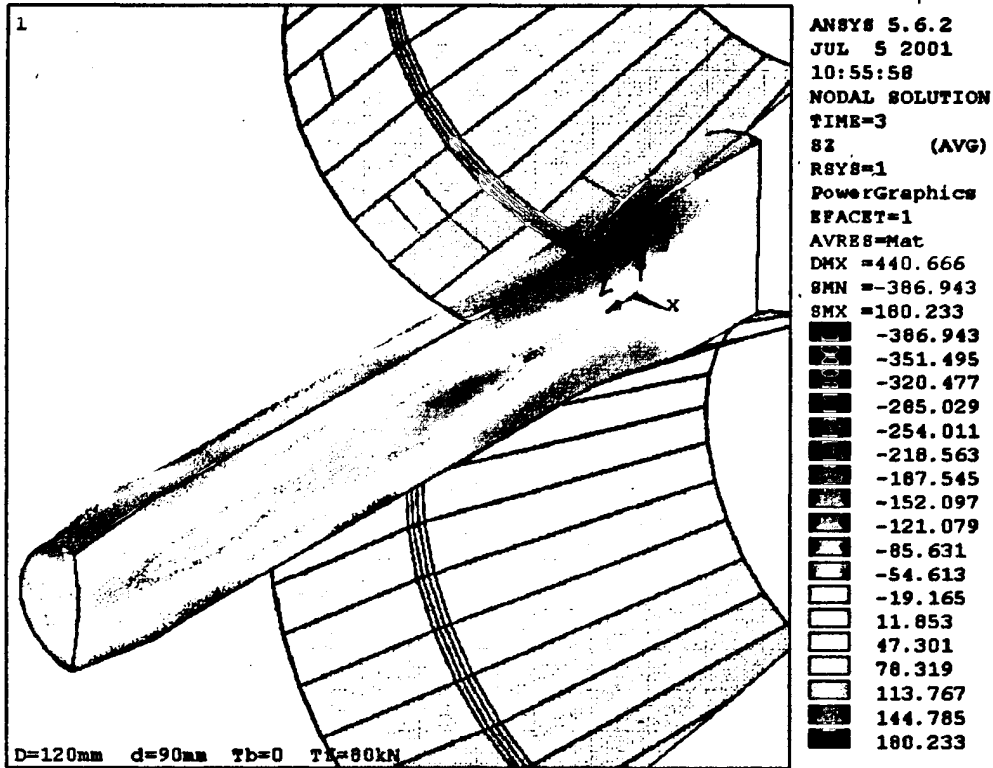
области расположены в межвалковой зоне и смещены от оси заготовки в сторону поверхности (см. рис. 52 б и рис. 51 б). Уровень растягивающих напряжений при трехвалковой прокатке с подпором в $1,7 \div 2$ раза ниже, чем при прокатке с подпором в 2-х валках, а сами эти напряжения удалены от оси заготовки, вследствие чего вероятность образования осевой рыхлости заготовки при прокатке в трех валках существенно ниже.

Анализ картины распределения радиальных напряжений в случае трехвалковой прокатки с натяжением $T = 80$ кН (рис. 57 б) показывает, что в зоне очага деформации находятся небольшие по площади участки максимальных радиальных напряжений, – с максимальными сжимающими напряжениями $\sigma_{r \max \text{ сжат}} = -225$ МПа и с максимальными растягивающими напряжениями $\sigma_{r \max \text{ раст}} = 151$ МПа. Площадь зоны максимальных растягивающих радиальных напряжений меньше, чем зона таких же напряжений при прокатке в трех валках с задним подпором (см. рис. 56 б и рис. 51 б).

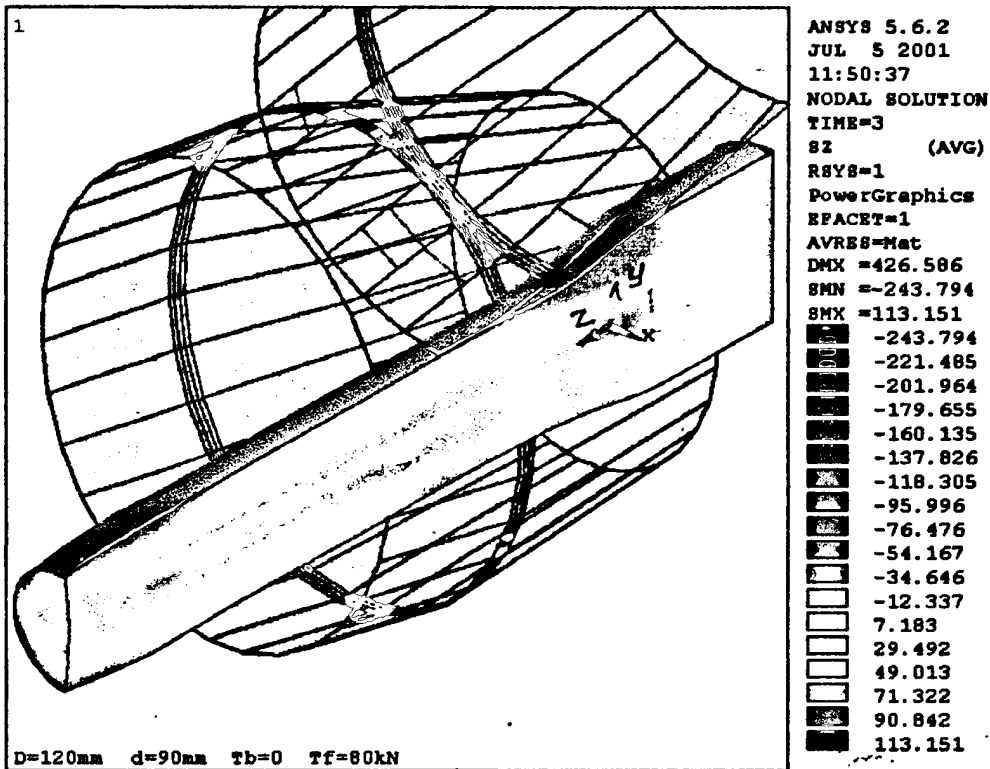
Из вышесказанного следует сделать вывод: трехвалковая схема прокатки с натяжением является более благоприятной.

Не менее интересной является картина распределения осевых напряжений σ_z в продольном сечении заготовки (рис. 53, 58). Величины осевых напряжений σ_z , возникающих в продольном сечении заготовки при прокатке с натяжением, определяются действием двух факторов: эффекта опережения внешних слоев заготовки относительно внутренних и приложения к переднему концу заготовки внешнего тянущего усилия (натяжения), равного в данном случае $T = 80$ кН. В то время как напряжения от силы натяжения равномерно распределяются по сечению заготовки, напряжения, обусловленные неравномерной деформацией в осевом направлении, также оказываются неравномерно распределенными по сечению.

Прокатка с натяжением в 2-х валках приводит к повышенным деформациям поверхностных слоев заготовки и, как следствие, к более высокому



a)



б)

Рис. 58 Распределение осевых напряжений σ_z (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

уровню остаточных осевых напряжений (сжимающих в поверхностных слоях и растягивающих – в центральных) по сравнению с аналогичной прокаткой в 3-х валках. Максимальные осевые остаточные напряжения в первом случае составили около 150 МПа (рис. 58 а), а во втором случае – 100 МПа (рис. 58 б).

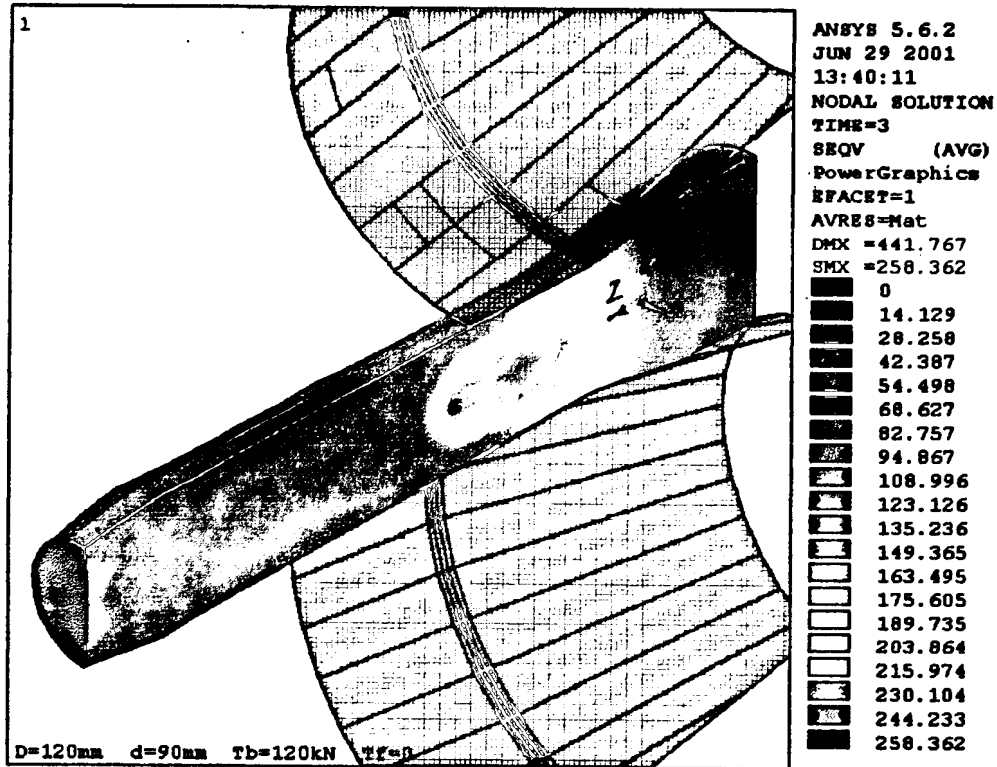
При прокатке с подпором напряжения от натяжения отсутствуют, и уровень осевых напряжений определяется только неравномерностью деформации заготовки по сечению. Для двухвалковой схемы осевые растягивающие напряжения достигали уровня 227 МПа (рис. 53 а) в то время, как при прокатке в трех валках максимальная величина этих напряжений составила 150 МПа (рис. 53 б).

Таким образом, вероятность возникновения поперечных трещин при прокатке с натяжением в 3-х валках значительно меньше, чем при других схемах деформации.

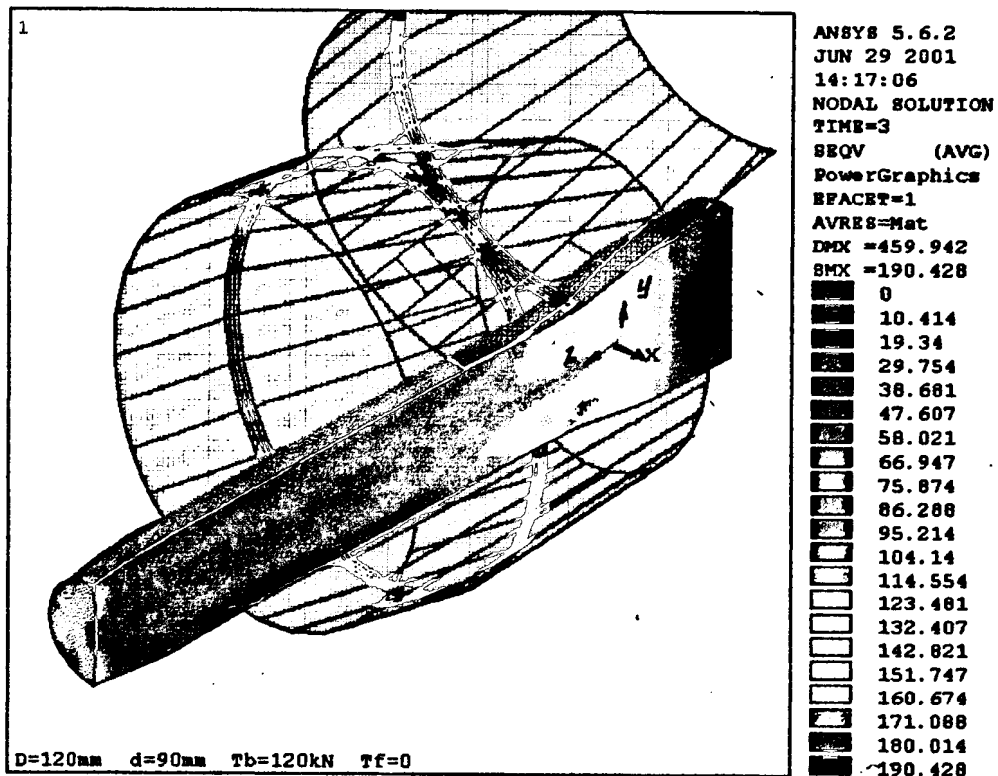
Сравнивая характер распределения и абсолютные величины эквивалентных напряжений σ_e в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором (рис. 59) с распределением таких же напряжений при прокатке с натяжением (рис. 60) можно отметить следующее:

- характер и рисунок распределения эквивалентных напряжений при прокатке по двухвалковой схеме прокатки с подпором и с натяжением очень схожи между собой. Максимальные эквивалентные напряжения сосредоточены в центральной (осевой) зоне заготовки;

- зона распределения максимальных эквивалентных напряжений при двухвалковой прокатке с натяжением (рис. 60) более обширна, чем при такой же прокатке с подпором. При прокатке с подпором $\sigma_{e \max} = 258$ МПа. Максимальные значения эквивалентных напряжений при прокатке с натяжением $\sigma_{e \max} = 216$ МПа. Это свидетельствует о меньшем сопротивлении деформированию металла при прокатке с осевым натяжением.

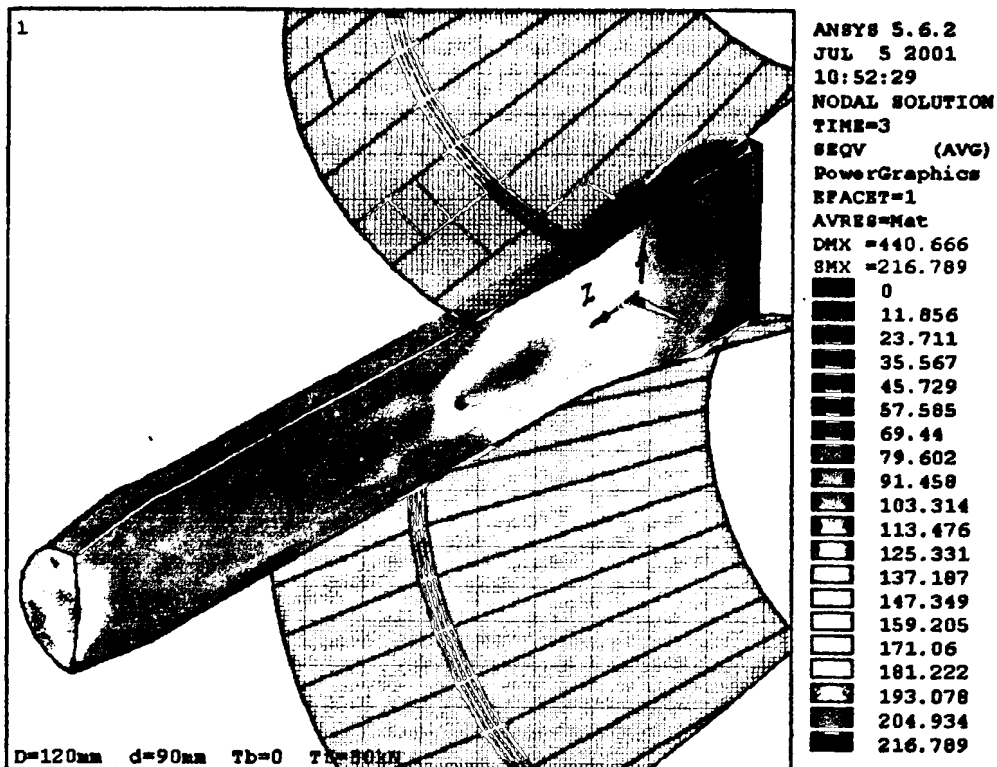


a)

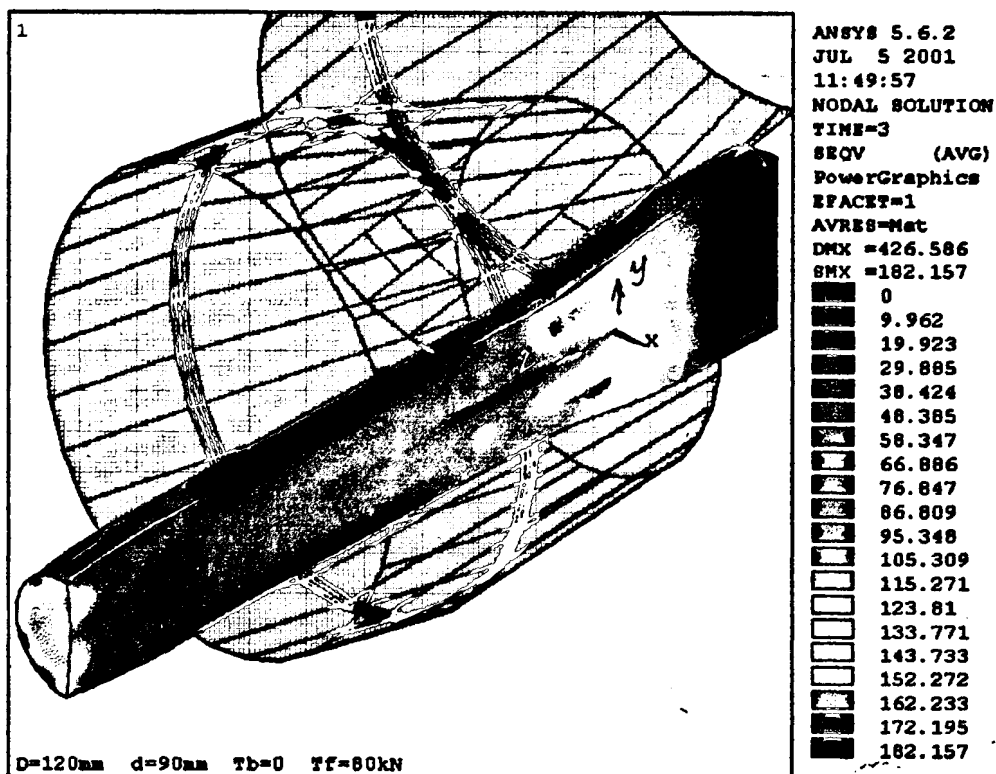


б)

Рис. 59 Распределение эквивалентных напряжений σ_e (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема



a)



б)

Рис. 60. Распределение эквивалентных напряжений σ_e (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

- при прокатке по трехвалковой схеме характер распределения эквивалентных напряжений в продольном сечении заготовки резко отличается от картины распределения напряжений при двухвалковой прокатке. Максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются только в зонах контакта заготовки с рабочими валками. В центральной части заготовки эквивалентные напряжения близки к нулю (рис. 59б, 60 б).

- при трехвалковой прокатке с натяжением максимальные значения эквивалентных напряжений несколько меньше ($\sigma_{e \max} = 152 \div 162$ МПа), чем при прокатке с подпором ($\sigma_{e \max} = 171 \div 180$ МПа).

При замене внешнего усилия подпора $T_b = 120$ кН, приложенного к заднему концу прокатываемой заготовки на тянущее осевое усилие натяжения $T = 80$ кН, приложенного к переднему концу заготовки характер распределения касательных напряжений, возникающих в плоскости, перпендикулярной оси Z $\tau_{r\phi}$ МПа, в зоне максимального обжатия прокатываемой заготовки, их интенсивность в значительной степени изменяется, как при двухвалковой прокатке (рис. 61 а), так и при трехвалковой схеме прокатки (рис. 61 б) в сравнении с картиной распределения касательных напряжений, возникающих при прокатке с подпором (рис. 54 б).

При двухвалковой схеме прокатки с натяжением (рис. 61 а) в указанном сечении заготовки четко выделены четыре зоны воздействия различных по знакам или направленности воздействия касательных напряжений, значению их абсолютных величин, интенсивности их распределения и площади сечения, на которых распространяется их воздействие.

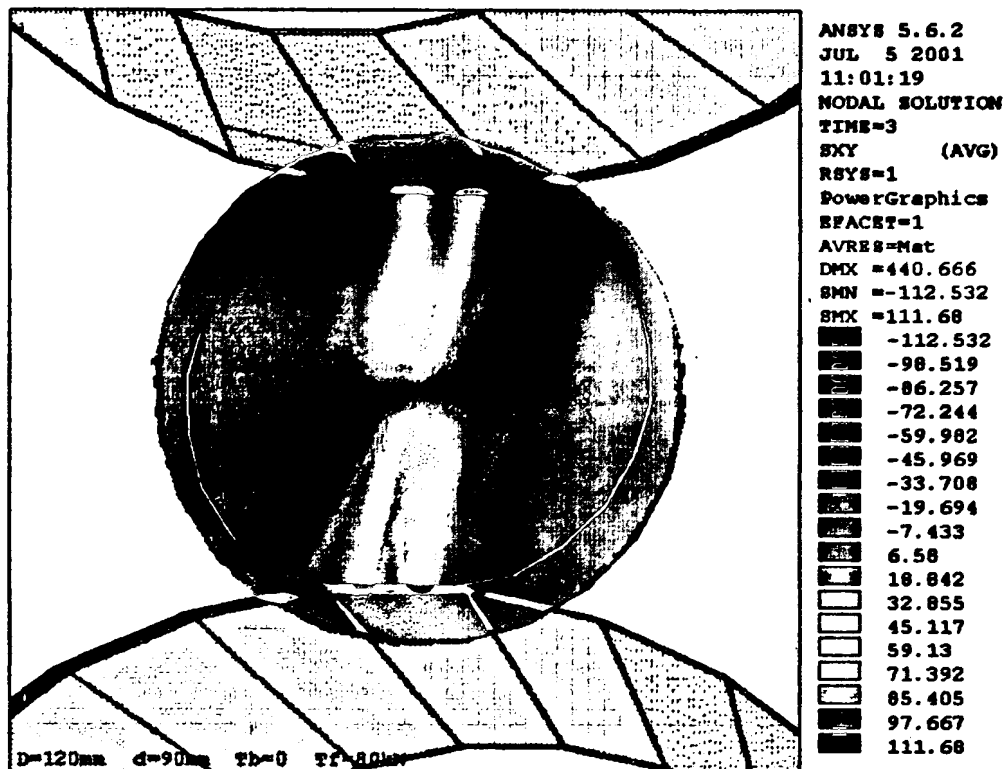
Во-первых, зона максимальных по величине положительно направленных касательных напряжений, состоящих из двух участков, каждый из которых похож на прямоугольник, берущих свое начало у поверхности заготовки в середине дуги обжатия и распространяющие свое действие к центру заготовки, но не достигающие его. Каждый из них отстоит от центра и друг

от друга на некотором расстоянии и сдвинут относительно другогго примерно на 180° , как и рабочие валки двухвалковой схемы. В свою очередь, внутри каждого из этих двух участков имеются клиновидные по форме (ярко красный цвет) участки действия максимальных касательных напряжений, где $\tau_{\text{гф max}} = 111,7$ МПа – в месте контакта заготовки с рабочими валками, которые уменьшаются по абсолютной величине и занимаемой площади в радиальном направлении к центру заготовки; каждый из двух прямоугольников желтого цвета ($\tau_{\text{гф max}} = 45 \div 71,3$ МПа) в свою очередь как бы окаймлен небольшим слоем (зеленый цвет), где напряжения имеют минимальное значение $\tau_{\text{гф min}} = 6,6$ МПа.

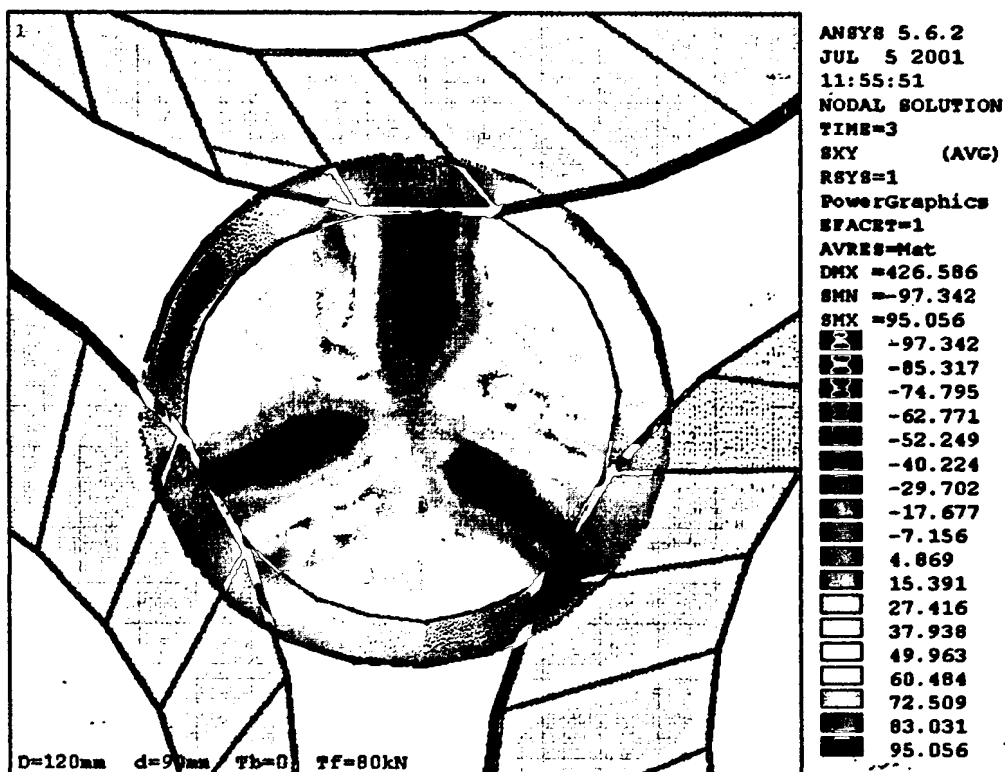
Сравнивая эту зону с такой же зоной при двухвалковой прокатке с подпором (рис. 54 а) можно увидеть существенные отличия. Они состоят в том, что при прокатке с подпором участки с максимальными касательными напряжениями находятся ближе к центральной оси заготовки, а в случае двухвалковой прокатки с натяжением картина обратная – пик максимальных касательных напряжений находится на поверхности заготовки в месте контакта ее с рабочими валками, уменьшаясь по мере продвижения вглубь заготовки к ее центральной части.

Зона действия максимальных по абсолютной величине отрицательно направленных касательных напряжений (темно-фиолетовый цвет), находится вне зоны контакта заготовки с рабочими валками и разрывает пополам первую зону действия положительно направленных касательных напряжений в центре заготовки. Абсолютная величина максимальных касательных напряжений в этой зоне достигает $\tau_{\text{гф max}} = -112,5$ МПа, что на 10-12% меньше величин при двухвалковой схеме прокатки с подпором (рис. 54 а).

Третья зона является также зоной отрицательно направленных касательных напряжений, но, меньших по абсолютной величине. По форме эта зона напоминает два симметричных столба по всему сечению заготовки, соединенных между собой перемычкой, т.е. напоминает букву «Н» (рис. 61 а).



a)



б)

Рис. 61 Распределение касательных напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси Z $\tau_{r\phi}$ (МПа) в зоне максимального обжима при прокатке с натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

В этой зоне касательные напряжения достигают абсолютных величин $\tau_{\text{гф}} = -72,2 \div -59,9$ МПа.

Четвертая зона является переходной, в которой касательные напряжения плавно меняют свой знак на обратный, т.е. плавно переходят в положительно-направленные касательные напряжения (от $\tau_{\text{гф}} = -7,4$ МПа до $\tau_{\text{гф}} = 6,58$ МПа). Эта зона состоит из двух симметричных частей – двух сегментов, находящихся в свободной от рабочих валков участков поперечного сечения заготовки, по обе стороны от третьей вышеописанной зоны.

Замена сжимающего внешнего усилия подпора $T_b = 120$ кН на растягивающее усилие натяжения $T = 80$ кН при трехвалковой схеме прокатки коренным образом меняет картину распределения касательных напряжений в плоскости, перпендикулярной оси Z в сечении максимального обжатия. В данном случае (рис. 61 б) ярко выражены две зоны. Зона отрицательных касательных напряжений представляет собой по форме трехлопастный пропеллер, одна лопасть которого проходит строго вертикально от верхнего валка от поверхности контакта с металлом заготовки до центра ее, остальные две "лопасти" по отношению к вертикальной и друг к другу находятся под углом 120° , соединяясь между собой в центре заготовки.

Центральная часть этой зоны является областью распределения максимальных по абсолютной величине отрицательных касательных напряжений (темно-фиолетовый цвет). Эти напряжения достигают пика своих значений $\tau_{\text{гф max}} = -97,3$ МПа, что меньше чем при двухвалковой прокатке с натяжением $\tau_{\text{гф max}} = -112,5$ МПа (рис. 61 а) и при прокатке по двухвалковой схеме с подпором $\tau_{\text{гф max}} = -125,6$ МПа (рис. 54 а). Помимо центральной части с максимальными касательными напряжениями, имеются еще две переходные зоны, где напряжения уменьшаются по обе стороны от центральной части: от $\tau_{\text{гф}} = -40 \div -17,6$ МПа до $\tau_{\text{гф}} = -7,1$ МПа.

Суммарная площадь поперечного сечения заготовки, в которой действуют отрицательно направленные касательные напряжения, примерно составляет одну треть от общей площади поперечного сечения заготовки.

Зона положительно направленных касательных напряжений занимает всю остальную площадь поперечного сечения заготовки и состоит из трех абсолютно одинаковых отдельных секторов, контуры которых ограничены внутри сечения зоной отрицательных касательных напряжений, а снаружи частью поверхности прокатанной заготовки, свободной от контактов с тремя рабочими валками. В свою очередь, площадь каждого из указанных секторов четко подразделяется на три участка. Участок с максимальными величинами положительно направленных касательных напряжений $\tau_{\text{гф max}} = 95 \text{ МПа}$, по форме представляет прямоугольник, меньшая сторона которого начинается от точки выхода заготовки из очага деформации (начало поверхности заготовки, свободной от контакта с рабочими валками), а более длинная сторона этого прямоугольника направлена вглубь заготовки к ее центру (темно-красный цвет). На втором участке минимальные касательные положительно направленные напряжения (светло-зеленый цвет) составляют $\tau_{\text{гф min}} = 27,4 \text{ МПа}$. Замыкающий третий участок со средними по абсолютным значениям касательными напряжениями с $\tau_{\text{гф}} = 50,0 \div 60,4 \text{ МПа}$ занимает примерно 1/3 площади каждого из 3-х секторов и заканчивается точкой входа в очаг деформации заготовки в следующий рабочий валок.

Хотя площади сечения заготовки, в которых распределены касательных напряжения при трехвалковой прокатке, значительно больше, нежели при двухвалковой прокатке с натяжением (рис. 61 б) и в обеих схемах прокатки с подпором (рис. 54) абсолютные величины положительно направленных касательных напряжений, возникающих при трехвалковой прокатке с натяжением меньше, чем такие же напряжения, возникающие в других сравниваемых вариантах.

4.4. Анализ распределения и описание напряжений, возникающих при двухвалковой и трехвалковой схемах прокатки с одновременным приложением сил подпора $T_b = 120 \text{ кН}$ и натяжения $T_f = 80 \text{ кН}$

Напряженно-деформированное состояние заготовки-прутка при прокатке в данном варианте можно рассматривать как суммирующую деформацию при одновременном приложении трех внешних сил:

- сжимающего усилия подпора T_b , прилагаемого к заднему торцу заготовки;
- сжимающих радиальных сил от воздействия рабочих валков на заготовку;
- растягивающего усилия натяжения T_f , прилагаемого к переднему торцу прокатываемого прутка.

При этом всю длину прутка-заготовки можно условно разделить на две части:

- входную (заднюю) часть, начиная от заднего торца до вертикального поперечного сечения в зоне максимального обжатия ее рабочими валками, находящуюся под воздействием суммарных усилий сжатия подпора $T_b = 120 \text{ кН}$ и сжимающих усилий от рабочих валков;
- выходную (переднюю ее часть), начиная от переднего торца прутка, к которому приложено растягивающее усилие натяжения $T_f = 80 \text{ кН}$, до того же вертикального поперечного сечения, совпадающего с сечением максимального обжатия, где действуют усилия сжатия от воздействия рабочих валков.

В процессе прокатки длина задней (входной) части заготовки, находящейся под воздействием сжимающего усилия подпора, будет уменьшаться, а длина передней ее части (выходной), к которой приложено растягивающее усилие натяжения, в процессе прокатки будет увеличиваться. Это означает,

что объем металла заготовки, находящийся под воздействием сжимающего усилия подпора с увеличением времени прокатки от 0 до t будет уменьшаться, а объем металла, находящийся под воздействием растягивающего усилия натяжения T_f – увеличиваться. С течением времени интенсивность воздействия сжимающего усилия подпора на все уменьшающийся объем металла заготовки будет возрастать при одновременном снижении интенсивности воздействия растягивающего усилия натяжения на увеличивающийся объем металла после очага деформации.

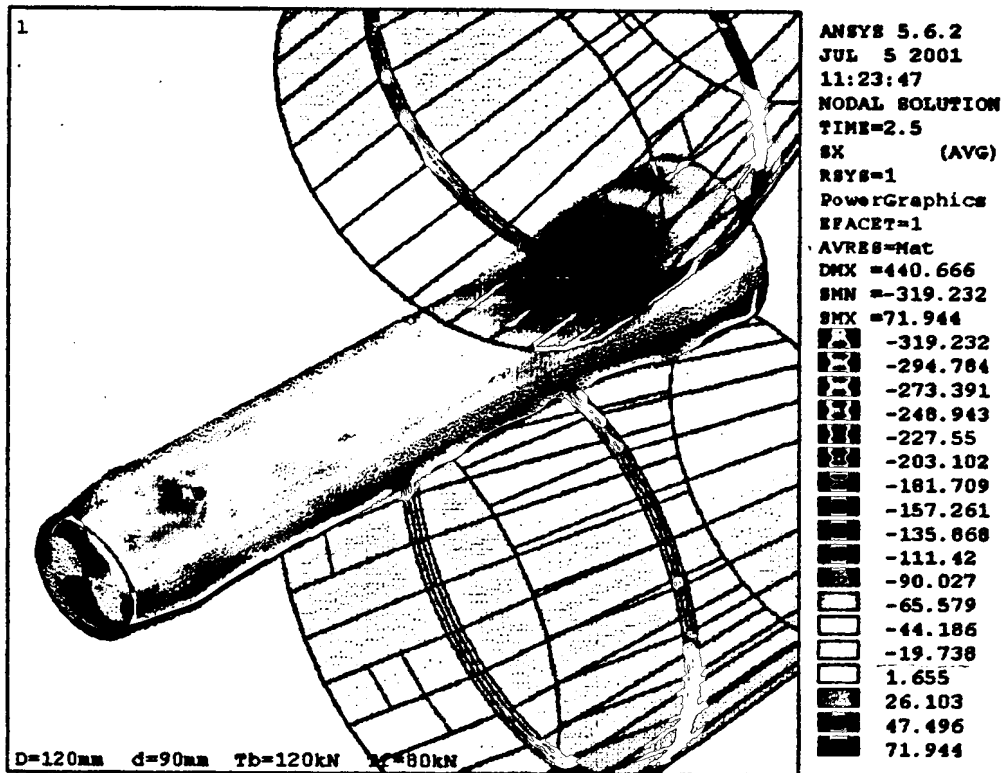
Данная схема одновременного приложения внешних усилий подпора и натяжения (при условии превышения силы подпора над силой натяжения) приводит практически к одинаковой картине распределения радиальных (σ_r) напряжений на поверхности прокатанного прутка как при двухвалковой, так и трехвалковой схемах прокатки (рис. 62). На общем фоне сжимающих радиальных напряжений (желто-зеленая окраска) в диапазоне $\sigma_r = -44,1 \div -20$ МПа при двухвалковой схеме прокатки (рис. 62 а) имеются локальные участки с растягивающими радиальными напряжениями равными $\sigma_r = 26,1 \div 47,4$ МПа.

Эти участки располагаются: один в зоне приложения тянущего усилия натяжения $T_f = 80$ кН, другой – в начальной зоне очага деформации, непосредственно под рабочим валком. Площадь распределения этих радиальных растягивающих напряжений невелика. Вся остальная площадь поверхности прокатанного прутка находится под воздействием небольших по абсолютной величине радиальных напряжений сжатия.

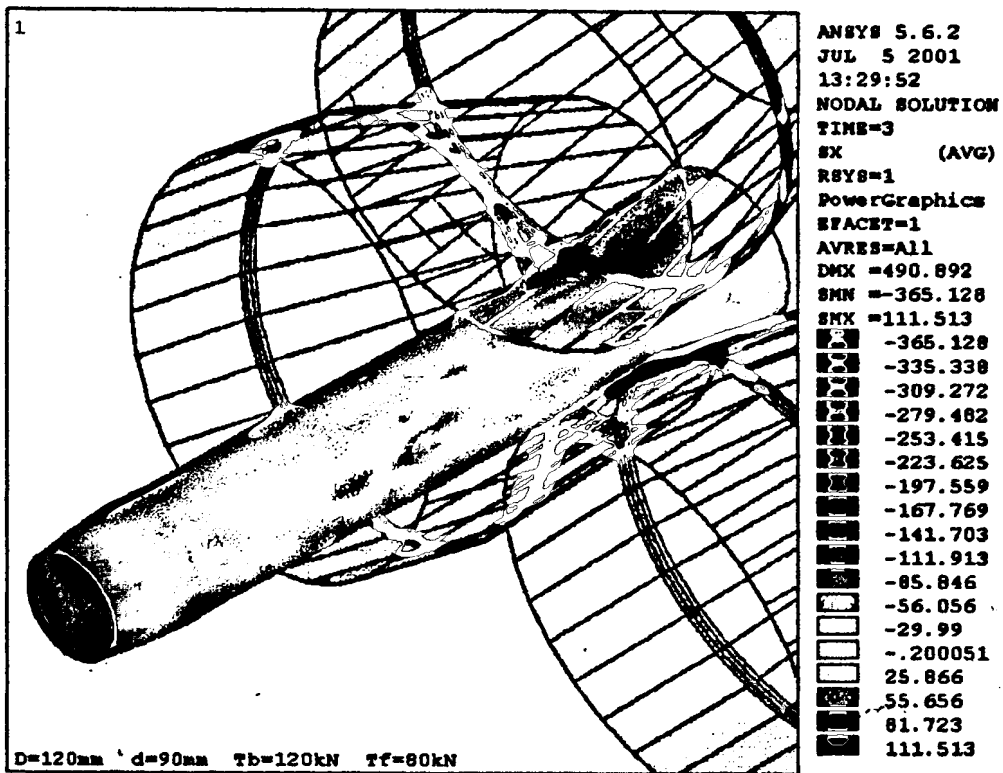
Зона действия максимальных по величине радиальных напряжений сжатия ($\sigma_r = -319 \div -273$ МПа) находится непосредственно в зоне воздействия рабочих валков в очаге деформации. Эти напряжения распределены на небольших площадях.

При прокатке на трехвалковой схеме (рис. 62 б) характер распределения радиальных напряжений на поверхности прокатанного прутка аналогич-

Вариант 3. Прокатка с подпором 120 кН и натяжением 80 кН



a)



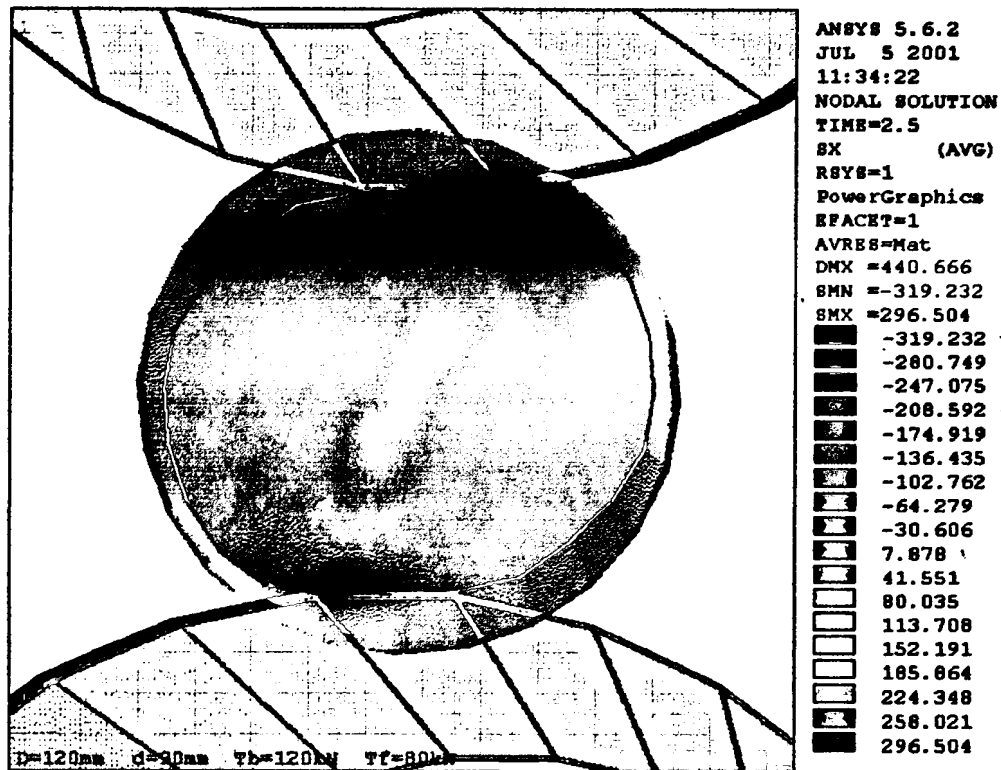
б)

Рис. 62 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) на поверхности заготовки при прокатке с подпором и натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

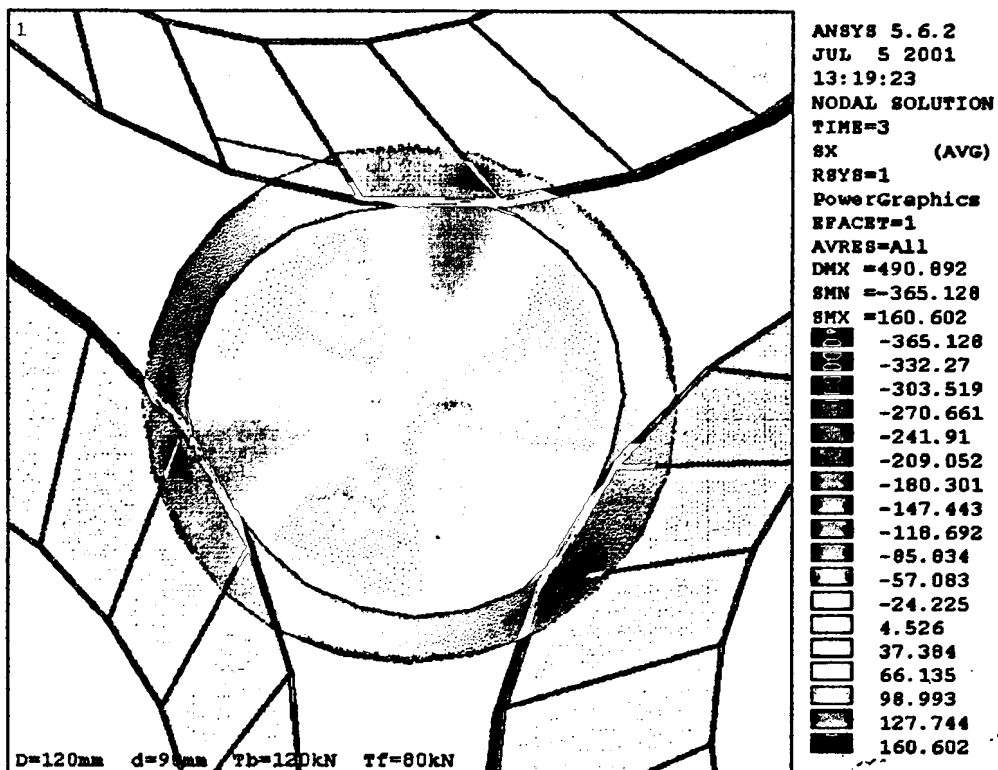
чен характеру распределения таких же напряжений при двухвалковой схеме, однако отдельных небольших локальных зон с наличием растягивающих радиальных напряжений на поверхности прокатанного прутка значительно больше, чем при двухвалковой прокатке. Заметно, что эти зоны расположены по винтовым линиям (рис. 62 б), что позволяет объяснить природу их возникновения "продавливанием" заготовки по образующим валков.

Подобная картина распределения радиальных напряжений в значительной степени объясняется при рассмотрении характера распределения радиальных напряжений σ_r в поперечном вертикальном сечении заготовки в зоне максимального обжатия ее рабочими валками (рис. 63). Рассматривая картину распределения радиальных напряжений при двухвалковой схеме прокатки (рис. 63 а) с одновременным приложением внешнего подпора $T_b = 120$ кН к заднему торцу и растягивающей силы $T_f = 80$ кН, приложенной к переднему концу заготовки, можно сразу заметить принципиальные отличия между рис. 63 а и рис. 63 б. Эти отличия состоят в том, что на рис. 63 а преобладающее значение и интенсивность воздействия имеют сжимающие радиальные напряжения σ_r как по занимаемой площади сечения, так и по абсолютной величине ($\sigma_r = -319 \div -30$ МПа). Эта зона сжимающих радиальных напряжений занимает примерно $\frac{3}{4}$ всей площади поперечного сечения заготовки. На оставшейся площади поперечного сечения распределены небольшие по абсолютному значению растягивающие радиальные напряжения $\sigma_r \approx 8$ МПа. В центральной части заготовки также имеется очень небольшая зона растягивающих напряжений (светло-зеленая зона), где $\sigma_r = 8 \div 41$ МПа.

Подобное положение можно объяснить следующим образом. Прокатка заготовки без подпора и натяжения на двухвалковой схеме характеризуется неравномерностью степени деформации в поперечном сечении заготовки (рис. 49 а), и этот фактор вызывает появление значительных радиальных



a)



б)

Рис. 63. Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) в зоне максимального обжима заготовки при прокатке с подпором и натяжением:
а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

растягивающих напряжений в межвалковых зонах. Помимо этого, одновременное воздействие рабочих валков в радиальном направлении и осевое внешнее усилие подпора вызывают суммарные радиальные сжимающие напряжения, которые "нейтрализуют" в значительной мере растягивающие радиальные напряжения, возникающие в результате неравномерности проникновения деформации по сечению в направлении, перпендикулярном действию сил прокатки (рис. 63 а).

При деформировании заготовки с применением трехвалковой схемы прокатки с одновременным воздействием на заготовку подпора и натяжения (рис. 63 б) характер распределения и величины радиальных напряжений в поперечном сечении прутка-заготовки в зоне максимального обжатия существенно отличается от выше рассмотренного (рис. 63 а).

Радиальные напряжения сжатия распределены по трем симметричным очень небольшим узким зонам, находящимся только на участках контакта с рабочими валками и представляющим собой по форме небольшие сектора (зеленый цвет), разделенные между собой тремя аналогичными секторами, в которых распределены радиальные напряжения растяжения (ярко-желтый цвет). Площадь этих секторов примерно в два раза больше, чем площадь секторов, в которых распределены радиальные напряжения сжатия.

Величины радиальных напряжений растяжения составляют от $\sigma_r = 4,5$ МПа на поверхности прокатанного прутка до $\sigma_r = 128$ МПа вблизи оси заготовки. При трехвалковой схеме прокатки только с подпором (рис. 51 б) эти величины составляли $\sigma_r = 41 \div 138$ МПа, а при трехвалковой прокатке с натяжением (рис. 56 б) $\sigma_r = 18,6 \div 107$ МПа.

Следует напомнить, что в этом случае (прокатка с натяжением) радиальные напряжения растяжения не достигают поверхности заготовки, а отстоят от поверхности заготовки на значительном расстоянии. А в центре заготовки эти зоны не соединены между собой, что свидетельствует об отсут-

ствии опасности вскрытия полости в центральной зоне прокатываемой заготовки.

Сравнивая характер и величины распределения радиальных напряжений с различным варьированием приложения внешних усилий подпора или натяжения, можно сделать вывод о возможности создания наперед заданных напряженных состояний в металле заготовки различными способами варьирования.

Например, радиальные напряжения растяжения в поперечном сечении заготовки будут примерно равны при:

а) двухвалковой схеме прокатки с натяжением $T_f = 80$ кН,

где $\sigma_r = 4,9$ МПа – 131 МПа (Рис. 56 а);

б) трехвалковой схеме прокатки с подпором $T_b = 120$ кН,

где $\sigma_r = 5,9$ МПа – 137 МПа (рис. 51 б);

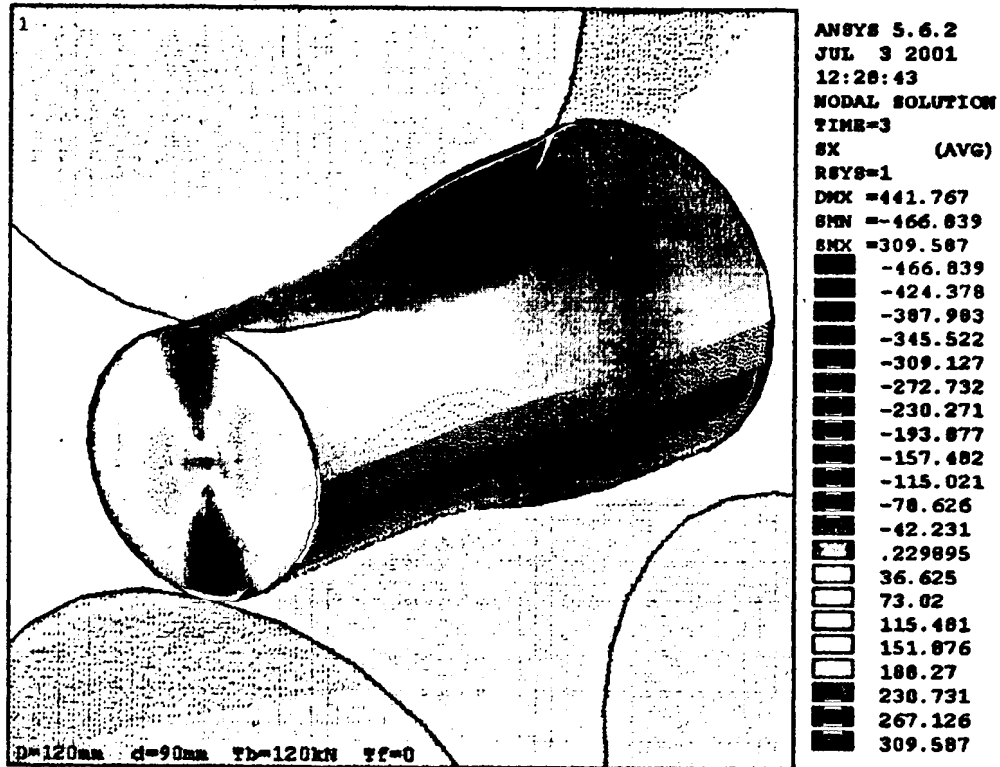
в) трехвалковой схеме прокатки и с подпором $T_b = 120$ кН и с натяжением $T_f = 80$ кН,

где $\sigma_r = 4,5$ МПа – 127 МПа (рис. 63 б).

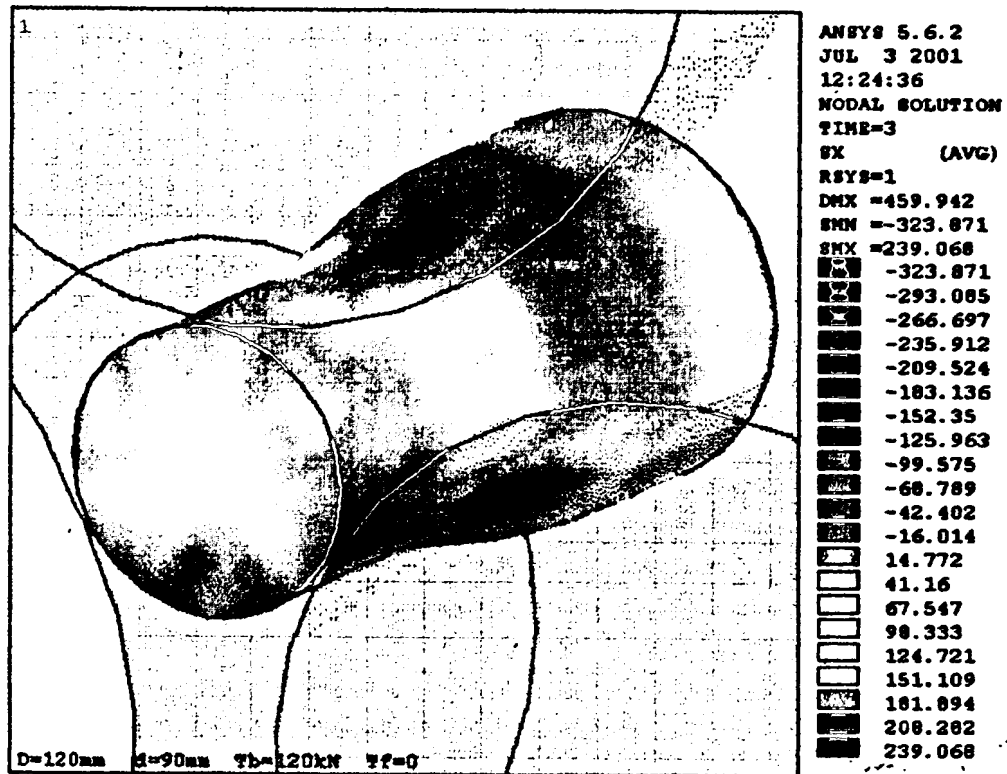
Применяя различные схемы прокатки (двух- и трехвалковые) и прикладывая различные внешние силы подпора и натяжения можно регулировать и создавать в процессе прокатки любые вариации напряженного состояния как в поперечных, так и в продольных ее сечениях с различными, наперед заданными радиальными, осевыми, касательными и эквивалентными напряжениями.

Влияние применяемой схемы прокатки (двух- и трехвалковой) и прилагаемых внешних сил подпора и натяжения наиболее характерно показано на рисунках.

На рис. 64 показана общая картина распределения радиальных напряжений σ_r , как в поперечном сечении заготовки на выходе из валков при прокатке по двухвалковой схеме с подпором, так и распределение их на по-



a)



b)

Рис. 64 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) на поверхности заготовки и в поперечном сечении на выходе из валков при прокатке с подпором:
 а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

верхности заднего конца заготовки, т.е. еще недеформированной части заготовки.

При входе заготовки в очаг деформации на ее поверхности наблюдаются сжимающие радиальные напряжения в пределах до 180 МПа, в то же время, непосредственно в зоне деформации возникают сжимающие контактные напряжения до 400 МПа.

В поперечном сечении заготовки (на выходе из валков) картина распределения радиальных напряжений совершенно другая. Наибольшая площадь сечения (от центра по обе стороны от рабочих валков) находится под воздействием значительных растягивающих радиальных напряжений; максимальных (красный цвет) в центре заготовки $\sigma_r = 267$ МПа и $\sigma_r = 188$ МПа, отстоящих примерно на одинаковом расстоянии и от центра и от поверхности заготовки.

Процесс прокатки на двухвалковой схеме сам по своей природе является источником возникновения растягивающих радиальных напряжений в поперечном сечении вследствие невозможности проведения равномерной деформации по этому сечению. Сила подпора, приложенная к заднему торцу заготовки, усиливает эффект неравномерного деформирования заготовки в поперечном сечении.

Прокатка по трехвалковой схеме практически устраняет неравномерность деформирования в поперечном сечении заготовки, а приложение к заднему концу заготовки сжимающей силы подпора $T_b = 120$ кН позволяет эту схему деформирования считать близкой к схеме всестороннего сжатия, если контур, образованный из трех рабочих валков, расположенных под углом 120° по отношению друг другу, представить как близкий к замкнутому.

При таких допущениях как на поверхности заготовки, так и в ее поперечном сечении должны возникать только сжимающие радиальные напряжения что и представлено на рис. 64 б. Максимальные сжимающие радиальные напряжения имеют место на участках контакта заготовки с рабочи-

ми валками ($\sigma_{r \max} = -324$ МПа). Преобладающие радиальные напряжения на остальной поверхности и в поперечном сечении заготовки находятся в пределах $\sigma_r = -99 \div -16$ МПа .

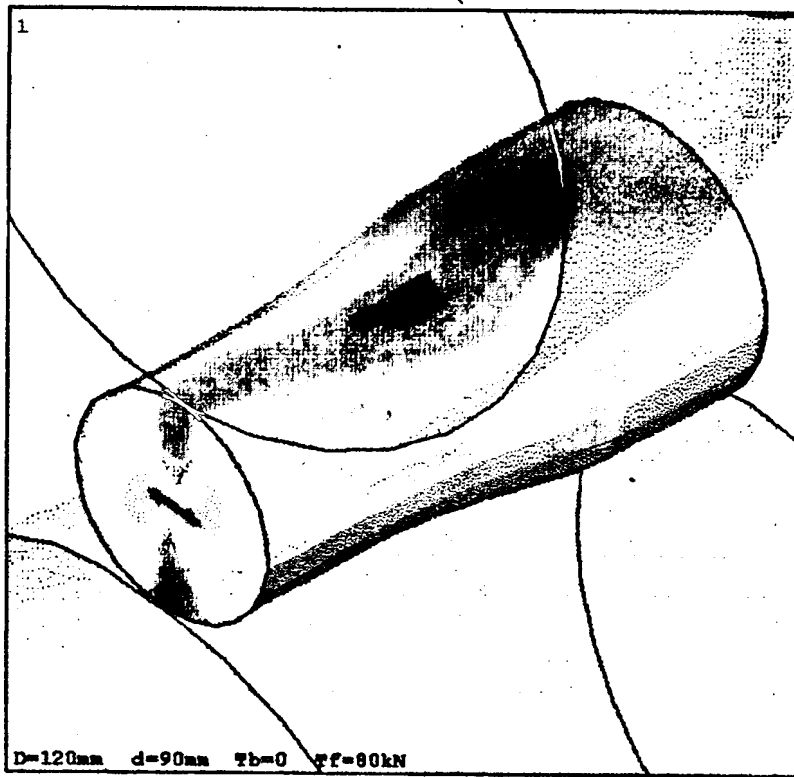
Растягивающие радиальные напряжения находятся только на поверхности заготовки в районе очага деформации, но свободной от контактов с рабочими валками и равны $\sigma_r = 15 \div 67,5$ МПа.

При замене внешне прилагаемой силы подпора $T_b = 120$ кН на осевую растягивающую силу натяжения $T_f = 80$ кН характер распределения радиальных напряжений на поверхности и в поперечном сечении, их абсолютные величины в значительной степени меняются.

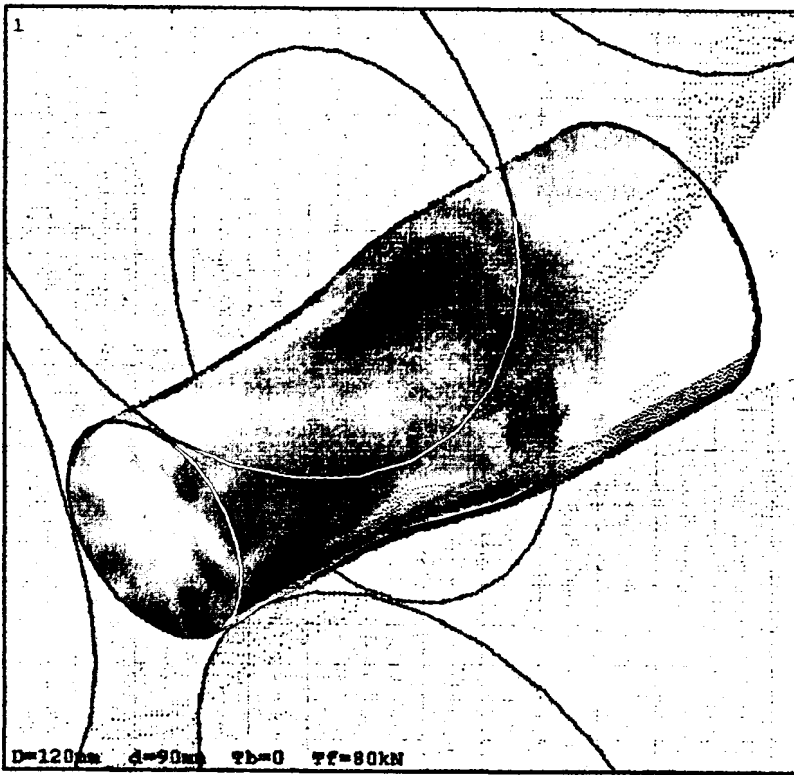
На рис. 65 показаны распределения радиальных напряжений при прокатке с натяжением. При двухвалковой схеме прокатки осевое растягивающее усилие натяжения (рис. 65 а) заметно снижает растягивающие радиальные напряжения в поперечном сечении на выходе заготовки из раствора рабочих валков с $\sigma_r = 267$ МПа (при двухвалковой схеме прокатки с подпором) до $\sigma_r = 188$ МПа (при прокатке с натяжением $T_f = 80$ кН). При этой схеме напряженного состояния значительно уменьшается зона действия этих растягивающих напряжений, особенно в центральной части поперечного сечения. Максимальная величина сжимающих радиальных напряжений достигается в местах контакта заготовки с рабочими валками и равна $\sigma_{r \max} = -430 \div -396,4$ МПа.

В данном случае внешнее осевая растягивающая сила натяжения является фактором, снижающим радиальные растягивающие напряжения, возникающие в результате неравномерности степени деформации по поперечному сечению и меняющим знак на противоположный радиальных напряжений на поверхности.

При трехвалковой схеме прокатки с натяжением осевая внешняя сила, прилагаемая к переднему концу также оказывает определенное влияние на характер распределения радиальных напряжений, но только в поперечном



a)



b)

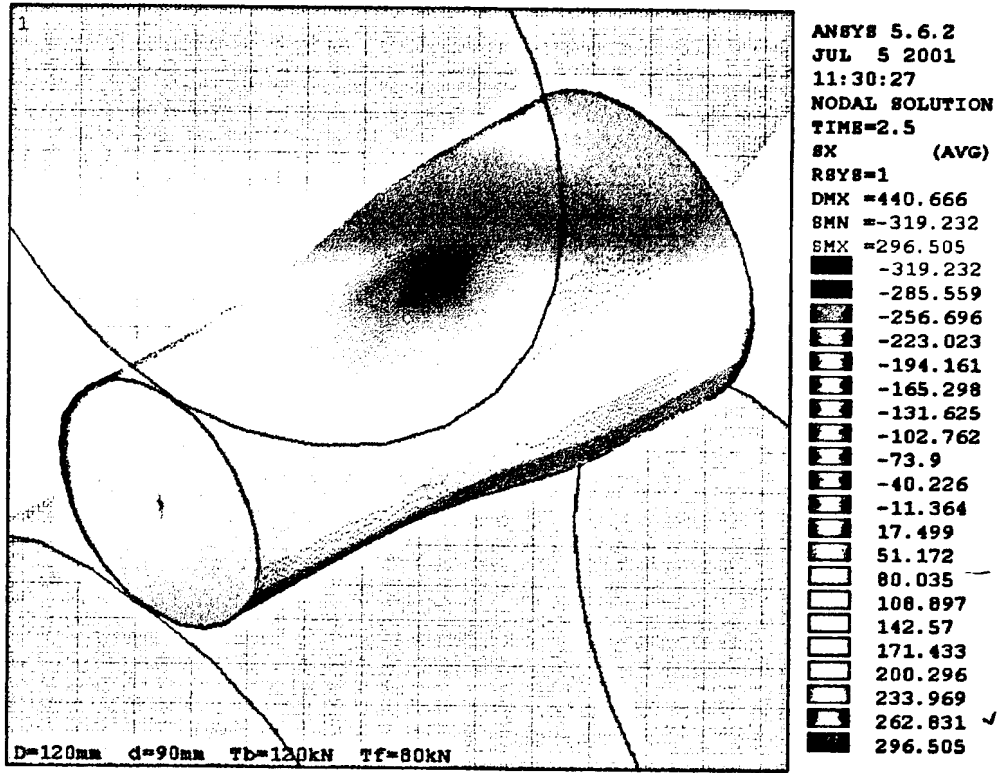
Рис. 65 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) на поверхности заготовки и в поперечном сечении на выходе из валков при прокатке с натяжением:
 а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

сечении заготовки при выходе ее из раствора рабочих валков. На характер распределения радиальных напряжений и их знаковое значение на поверхности заготовки заднего конца (т.е. недеформированной еще части заготовки) осевое усилие натяжения $T_f = 80$ кН практически не влияет. Растягивающее влияние силы натяжения сказывается только в поперечном сечении заготовки на выходе его из раствора рабочих валков. Это хорошо видно на поперечном сечении заготовки (рис. 65 б). Максимальные радиальные сжимающие напряжения при прокатке на трехвалковой схеме с натяжением на поверхности заготовки в зонах контакта с рабочими валками достигают величины $\sigma_r = -225,5$ МПа, что значительно меньше, чем максимальные сжимающие радиальные напряжения при трехвалковой прокатке с подпором ($\sigma_r = -324$ МПа) и в два раза меньше, чем при двухвалковой прокатке ($\sigma_r = -466$ МПа).

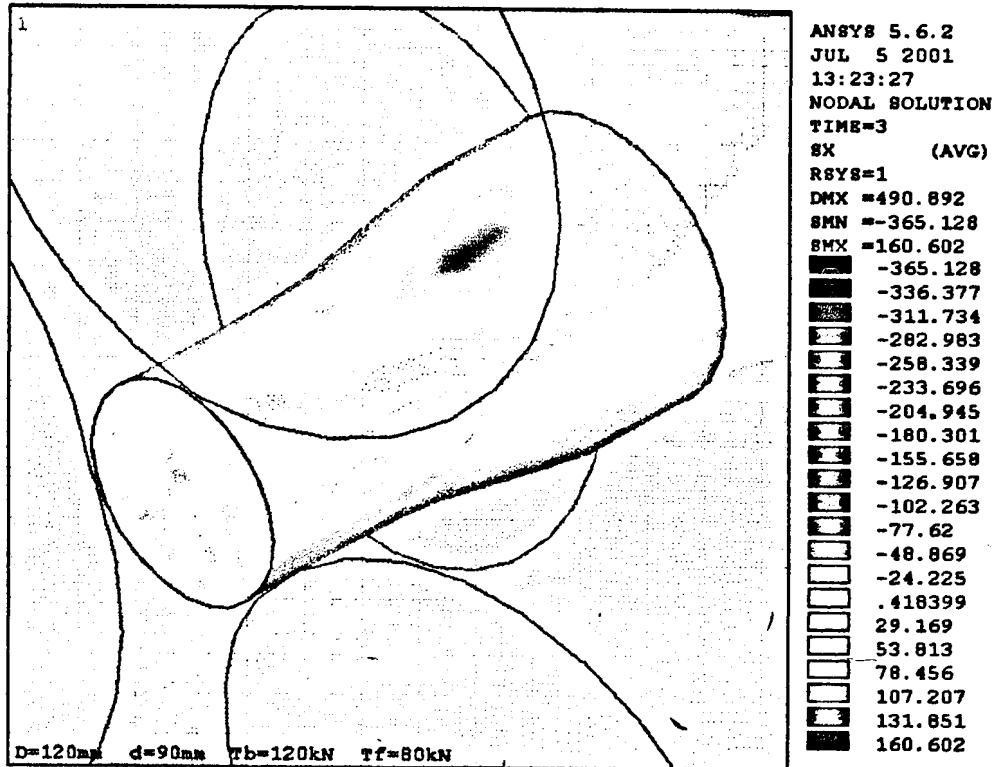
При одновременном воздействии на заготовку сил подпора и натяжения в процессе деформирования ее по обеим схемам распределение радиальных напряжений на поверхности заготовки (рис. 66) и в поперечном сечении при выходе заготовки из валков имеет некоторую общность и различие. Так, максимальные сжимающие радиальные напряжения при двухвалковой прокатке достигают $\sigma_{r \max} = -319$ МПа, при трехвалковой они имеют несколько большие абсолютные величины ($\sigma_{r \max} = -365$ МПа). Минимальные соответственно равны $\sigma_{r \min} = -11,3$ МПа и $-24,2$ МПа.

На поверхности заготовки имеют место и растягивающие радиальные напряжения, достигающие величин: при двухвалковой прокатке $\sigma_r = 17,5 \div 51$ МПа (рис. 65 а); при трехвалковой прокатке — $\sigma_r = 0,4 \div 107$ МПа (рис. 66 б). Зоны распределения радиальных растягивающих напряжений находятся на поверхности заготовки, свободной от контактов с рабочими валками.

Что касается распределения радиальных напряжений в поперечном сечении на выходе заготовки из очага деформации, то их величины и характер



a)



b)

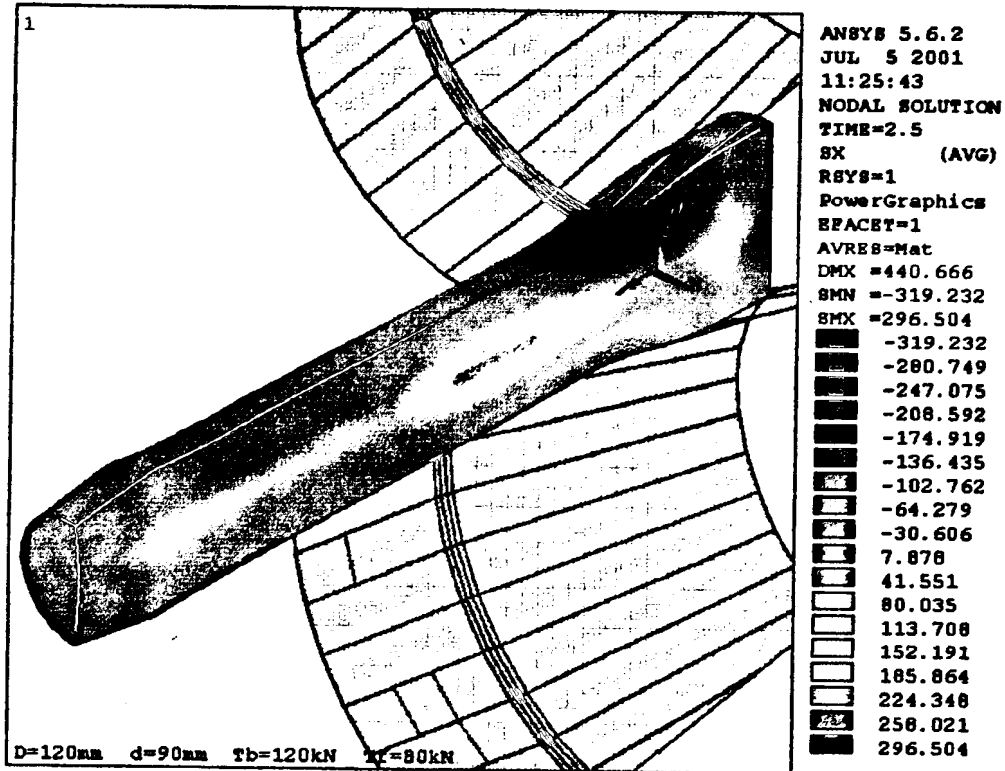
Рис. 66 Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) на поверхности заготовки и в поперечном сечении на выходе из валков при прокатке с подпором и натяжением:
 а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

распределения разные. При двухвалковой схеме растягивающие радиальные напряжения достигают $\sigma_{r \max} = 296,5$ МПа и представляют собой очень узкую полосу, находящуюся в центральной зоне заготовки (рис. 66 а).

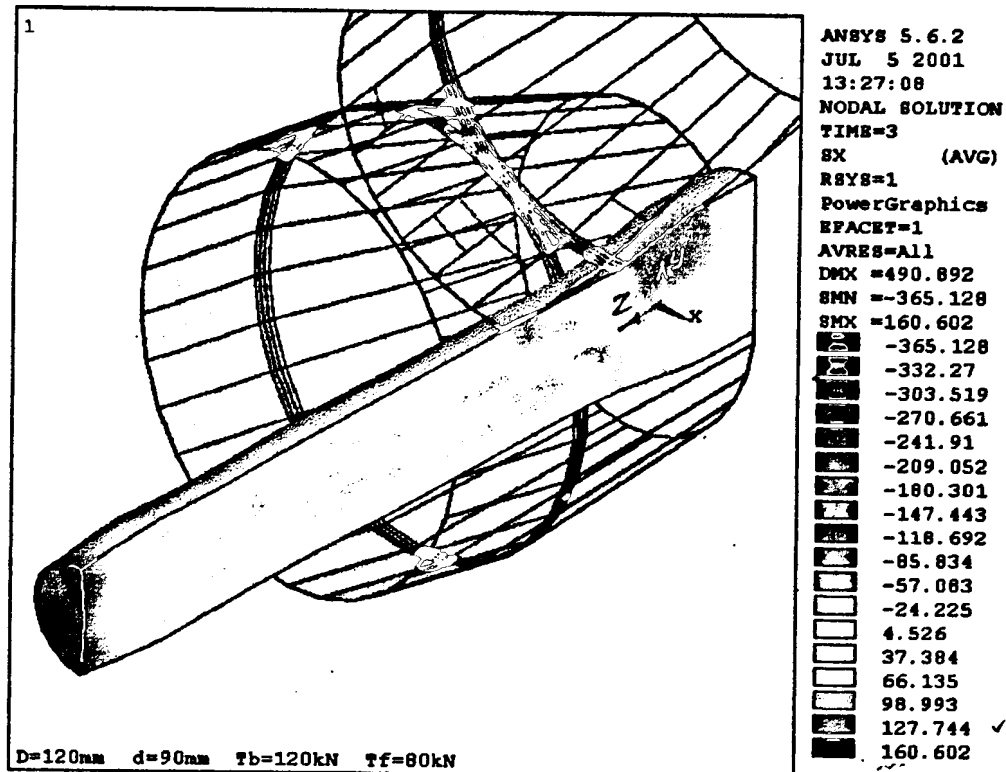
При трехвалковой схеме прокатки распределение радиальных растягивающих напряжений в поперечном сечении, представляет собой три соединенных в центре заготовки сектора. Величины этих растягивающих радиальных напряжений в центре заготовки составляют $\sigma_r = 78,5$ МПа. Сектора с растягивающими радиальными напряжениями разделены между собой такими же секторами, в которых преобладают радиальные сжимающие напряжения, достигающие величины $\sigma_r = -48,8$ МПа на поверхности заготовки в местах контакта ее с рабочими валками. Минимальные значения сжимающих радиальных напряжений в поперечном сечении на выходе заготовки из валков равны $\sigma_r = -24,2$ МПа. Зона их действия находится на некотором удалении от центра поперечного сечения (рис. 66 б).

Это говорит о том, что при одновременном приложении усилий подпора и натяжения в поперечном сечении заготовки степень деформирования неодинакова по сечению и уменьшается к центру, что приводит к возникновению растягивающих радиальных напряжений в поперечном сечении.

Одновременное приложение внешних сил подпора и натяжения в значительной мере меняет картину распределения радиальных напряжений и в продольном сечении заготовки (рис. 67). При двухвалковой схеме прокатки (рис. 67 а) максимальные по величине сжимающие радиальные напряжения возникают в зонах контакта рабочих валков с заготовкой $\sigma_r = -280 \div -174$ МПа, зона действия максимальных по величине растягивающих радиальных напряжений ($\sigma_{r \max} = 296,5$ МПа) расположена в центральной части заготовки в очаге деформации. В остальной части продольного сечения заготовки имеют место небольшие радиальные растягивающие напряжения ($\sigma_r = 7,8 \div 41,5$ МПа).



a)



б)

Рис. 67. Распределение радиальных напряжений σ_r (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором и натяжением:
а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

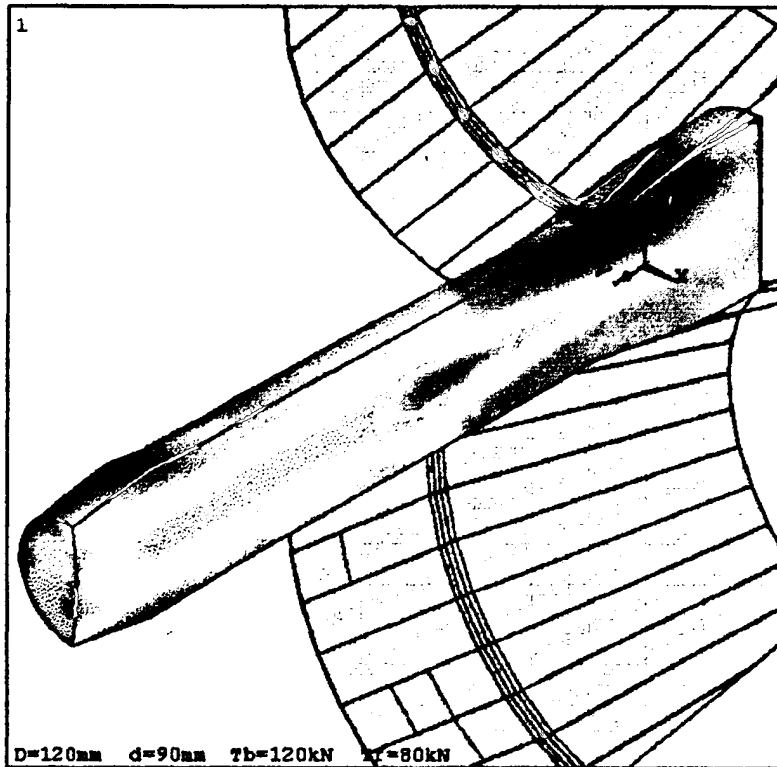
Наличие максимальных растягивающих радиальных напряжений, находящихся в зоне очага деформации – это результат неравномерности деформации, всегда имеющей место при двухвалковой схеме прокатки, а наличие на остальной части площади продольного сечения небольших по величине растягивающих радиальных напряжений – это результат от суммарного воздействия силы подпора, силы прокатки в очаге деформации и силы натяжения.

При трехвалковой схеме прокатки с одновременным приложением сил подпора и натяжения (рис. 67 б) значительную площадь продольного сечения заготовки также занимают небольшие по величине сжимающие радиальные напряжения, равные $\sigma_r = -24,2$ МПа при одновременном наличии и растягивающих радиальных напряжений $\sigma_r = 4,5 \div 37,3$ МПа.

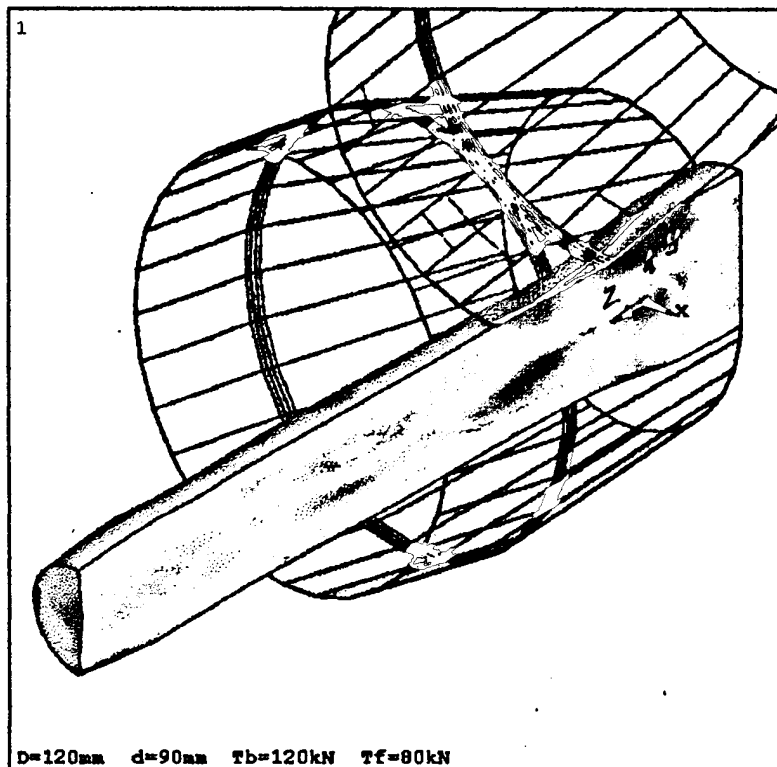
Максимальные сжимающие радиальные напряжения находятся в зоне воздействия рабочих валков и они примерно равны $\sigma_r = -147 \div -119$ МПа. Максимальные растягивающие радиальные напряжения находятся там же, но в промежутках, свободных от воздействия рабочих валков, и они равны $\sigma_r = 99$ МПа, т.е. в $2 \div 2,5$ раза меньше, чем при двухвалковой схеме.

Подобное распределение радиальных напряжений, как в поперечном, так и в продольном сечениях, можно объяснить преобладающим суммарным воздействием сжимающего усилия подпора и сжимающего усилия от воздействия рабочих валков на металл над радиальными растягивающими напряжениями, возникающими от неравномерности деформации.

Еще в большей степени это «гасящее» воздействие подпора и натяжения заметно при рассмотрении распределения осевых напряжений σ_z в продольном сечении заготовки (рис. 68) в сравнении с прокаткой только натяжением (рис. 58). Приложения силы подпора T_b и преобладание ее по абсолютной величине над силой натяжения $\Delta = T_b - T_f = 120 - 80 = 40$ кН в случае при двухвалковой прокатки с натяжением (рис. 58 а) в значи-



a)



б)

Рис. 68 Распределение осевых напряжений σ_z (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором и натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

тельной мере «гасит» многократные пиковые зоны с растягивающими осевыми напряжениями, превращая их в более спокойную и равновесную зону только с одним небольшим участком максимальных растягивающих осевых напряжений, расположенным внутри заготовки под очагом деформации с абсолютной величиной $\sigma_z = 215$ МПа.

В целом распределение осевых напряжений в продольном сечении заготовки при прокатке с одновременным воздействием сил подпора и натяжения при двухвалковой прокатке можно приставить следующим образом. Центральная внутренняя осевая часть заготовки представляет некий объем с радиусом, примерно равным $1/3$ от радиуса всей заготовки – область значительных растягивающих осевых напряжений $\sigma_z = 147 \div 110$ МПа с их максимальным значением внутри очага деформации $\sigma_z = 215$ МПа. Вторую, большую часть объема заготовки (периферийную часть ближе к поверхности заготовки), представляет объем, находящийся под воздействием очень небольших растягивающих осевых напряжений, равных $\sigma_z = 9,7$ МПа. Третья часть объема заготовки – от очага деформации до заднего торца – объем, подверженный воздействию значительных сжимающих осевых напряжений, с максимальным их значением в зонах контакта с рабочими валками $\sigma_z = -301,5$ МПа.

При трехвалковой схеме прокатки с подпором и натяжением распределение осевых напряжений по продольному сечению заготовки (рис. 68 б) в значительной мере отличается от распределения напряжений при двухвалковой схеме. В данном случае, отсутствуют ярко выраженные зоны с различными максимальными и минимальными напряжениями, и распределение осевых растягивающих напряжений по всей площади продольного сечения более равномерно. Однако в зоне очага деформации, имеется выраженная зона максимальных растягивающих осевых напряжений, равных $\sigma_z = 103$ МПа, находящаяся вблизи к центральной осевой части заготовки, и

три небольших зоны с такими же значениями напряжений, находящихся на участках, свободных от контакта с рабочими валками.

Минимальные растягивающие осевые напряжения $\sigma_z = 58,5 \div 13,6$ МПа располагаются на периферийных частях заготовки ближе к поверхности.

При двухвалковой схеме прокатки с подпором и натяжением разница между максимальными и минимальными значениями осевых растягивающих напряжений составляют $\Delta \sigma_z = \sigma_{z \max} - \sigma_{z \min} = 215,7 - 9,7 = 206$ МПа, тогда как при трехвалковой схеме прокатки эта разница значительно меньше и составляет $\Delta \sigma_z = \sigma_{z \max} - \sigma_{z \min} = 103,4 - 13,6 = 89,8$ МПа, что говорит о более благоприятном напряженно-деформированном состоянии заготовки при прокатке с применением трехвалковой схемы деформирования.

Рассматривая величины и характер распределения эквивалентных напряжений в продольном сечении заготовки при двух- и трехвалковой схемах прокатки с одновременным приложением к торцам заготовки внешних сил подпора $T_b = 120$ кН и натяжения $T_f = 80$ кН (рис. 69) и сравнивая их величины и распределения с другими схемами напряженного состояния заготовки можно сделать определенные выводы.

Характеры распределения эквивалентных напряжений σ_e в продольном сечении заготовки при двухвалковой схеме прокатки с различными видами внешнего нагружения заготовки (подпор, натяжение, подпор + натяжение) идентичны между собой.

Максимальные значения эквивалентных напряжений находятся в зонах, находящихся в границах очага деформации.

Меньшие значения максимальных эквивалентных напряжений среди рассматриваемых схем прокатки с внешними нагружениями заготовки имеют место при двухвалковой прокатке с натяжением ($\sigma_e = 216,7$ МПа). При других схемах нагружения максимальные эквивалентные напряжения

равны: прокатка с подпором $\sigma_e = 258,3$ МПа, прокатка с подпором и натяжением - $\sigma_e = 240$ МПа.

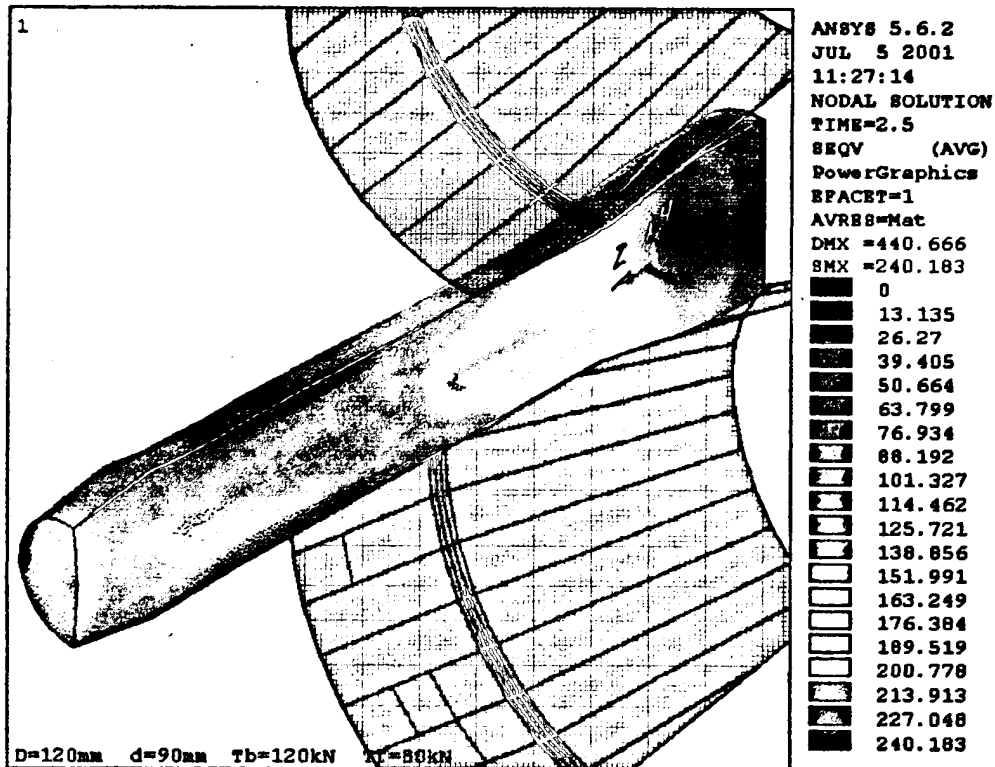
При трехвалковой схеме прокатки с приложением различных внешних сил (подпор, натяжение, подпор + натяжение) характер распределения и абсолютные величины эквивалентных напряжений в продольном сечении заготовки существенно отличаются от этих же показателей при двухвалковой схеме прокатки.

Так, если при двухвалковой схеме максимальные пиковые значения эквивалентных напряжений расположены в центральной зоне очага деформации и уменьшаются к периферии (к поверхности) заготовки, то при трехвалковой схеме, наоборот, максимальные значения эквивалентных напряжений расположены непосредственно на поверхности заготовки в месте контакта трех рабочих валков с деформируемой заготовкой, уменьшаясь по своей абсолютной величине по мере приближения к осевой центральной части продольного сечения заготовки.

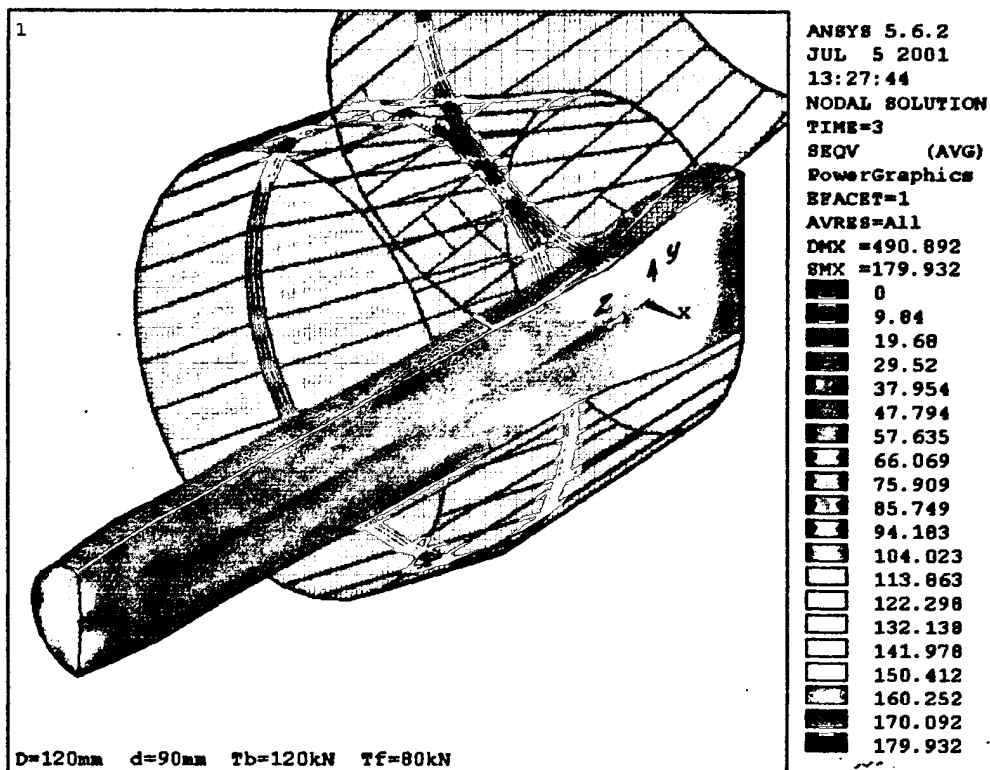
Характер распределения эквивалентных напряжений при прокатке по трехвалковой схеме с различными внешними силами (подпор, натяжение, подпор + натяжение) примерно одинаков, а по своей абсолютной величине они близки своими максимальными значениями $\sigma_e = 171$ МПа (подпор), $\sigma_e = 162$ МПа (натяжение), $\sigma_e = 160$ МПа (подпор + натяжение).

Сравнивая значения максимальных эквивалентных напряжений при двух- и трехвалковой схемах прокатки можно говорить о трехвалковой схеме как о более предпочтительной, а анализ результатов с различными видами внешних нагрузок (подпор, натяжение, подпор + натяжение) с учетом зон их действия, говорит о более благоприятной схеме трехвалковой прокатки с натяжением.

С одновременным приложением дополнительных внешних сил подпора $T_b = 120$ кН и натяжения $T_f = 80$ кН картина распределения касательных напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси Z в зоне



a)



b)

Рис. 69. Распределение эквивалентных напряжений σ_e (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором и натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

максимального обжатия при двухвалковой прокатке (рис. 70 а) резко отличается от характера распределения этих напряжений при двухвалковой схеме с натяжением (рис. 61 а) отсутствием обширной зоны средних по значению отрицательно направленных касательных напряжений (зона, напоминающих по форме букву «Н»), и очень близка характером распределения и своими абсолютными величинами к распределению касательных напряжений при двухвалковой прокатке с подпором (рис. 54 а). В этих обоих случаях имеются полностью совпадающие:

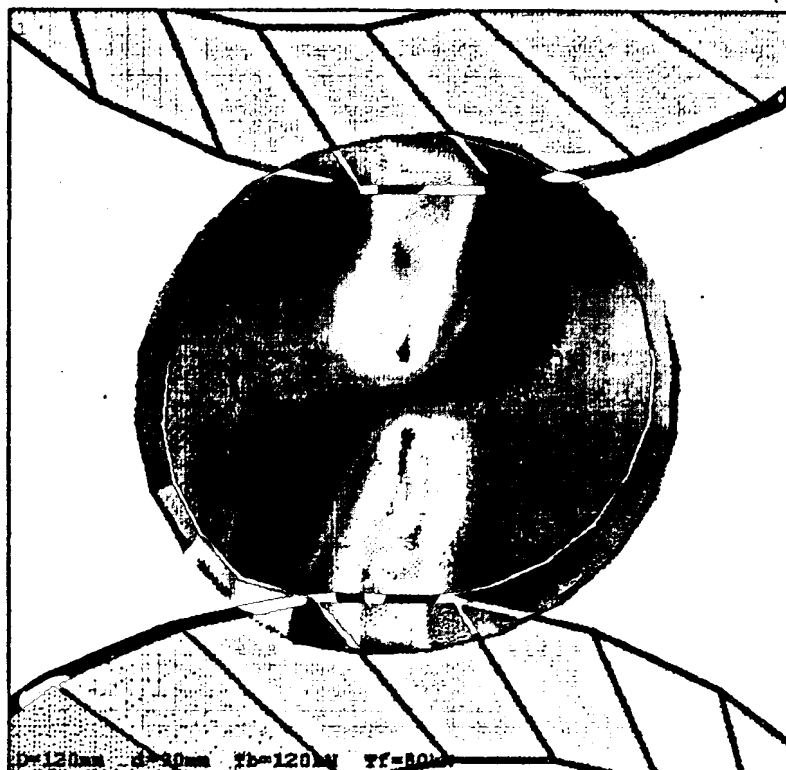
зоны положительно направленных касательных напряжений, которая также как и в случае прокатки с подпором состоит из двух разделенных между собой в центральной части заготовки участков с $\tau_{гф} = 120$ МПа;

зоны отрицательно направленных касательных напряжений, идентичные по форме расположения и абсолютным значением с распределением при прокатке с подпором $\tau_{гф} = -121$ МПа (рис. 54 а);

переходные зоны касательных напряжений, находящиеся на периферии поверхности заготовки, свободные от контакта с рабочими валками, где $\tau_{гф} = -21,3 \div -8,0$ МПа переходят в положительно направленные напряжение $\tau_{гф \text{ раст}} = 20,2 \div 7$ МПа.

Разница в этих сравниваемых случаях (рис. 54 и рис. 70) состоит в том, что в случае двухвалковой схемы прокатки (рис. 70 а) в зоне с положительно направленными касательными напряжениями пиковые значения их более интенсивны в центральной части поперечного сечения, где $\tau_{гф} = 120$ МПа. В случае приложения к торцу заготовки тянущей силы $T_f = 80$ кН, эти напряжения достигают величины $\tau_{гф} = 101$ МПа (рис. 70).

Максимальные величины отрицательно направленных касательных напряжений практически совпадают, что также говорит о сглаживающем воздействии усилия натяжения, которое несколько снижает напряжения сжатия в последнем случае (рис. 70 а).



a)



б)

Рис. 70. Распределение касательных напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси Z $\tau_{r\phi}$ (МПа) в зоне максимального обжима при прокатке с подпором и натяжением: а – двухвалковая схема; б – трехвалковая схема

При трехвалковой схеме прокатки с одновременным воздействием сил подпора и натяжения (рис. 70 б) распределение касательных напряжений меняются кардинальным образом по сравнению с трехвалковой прокаткой с натяжением (рис. 61 б). В частности, зоны с положительно и отрицательно направленными касательными напряжениями меняются местами. При трехвалковой прокатке с одновременным воздействием сил подпора и натяжения (рис. 70 б) в поперечном сечении большую часть площади занимает зона с максимальными отрицательно направленными касательными напряжениями, состоящая из трех отдельных секторов. Она находится на участке, свободном от контакта с рабочими валками (участки с темно-фиолетовым цветом).

В варианте трехвалковой прокатки с натяжением (рис. 61 б) эти участки были местом нахождения участков зоны с максимальными положительно направленными касательными напряжениями. Максимальные значения отрицательно направленных касательных напряжений в большей степени распределены в центральной части сечения заготовки и достигают величин $\tau_{\text{гф}} = -75$ МПа, что значительно меньше, чем при трехвалковой прокатке с натяжением $\tau_{\text{гф}} = -97$ МПа (рис. 61 б).

Зона с максимальными положительно направленными касательными напряжениями состоит из трех небольших различных участков узкой клиновидной формы и находится непосредственно в районе контакта заготовки с рабочими валками. Максимальные значения положительно направленных касательных напряжений достигают в местах контакта с рабочими валками $\tau_{\text{гф}} = 86,5$ МПа и они уменьшаются в радиальном направлении вглубь, к центральной части заготовки.

4.5. Некоторые соображения о возможностях дальнейшего применения метода трехмерного конечно-элементного моделирования процессов поперечно-винтовой прокатки и выводы по результатам исследования

Анализ результатов примененного в данной работе метода трехмерного конечно-элементного моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки позволяет **сделать некоторые предварительные выводы.**

1. Данный метод позволяет наглядным образом отображать и решать объемные задачи в пространстве и времени, в динамике развития процесса и в статике, во всех необходимых сечениях прокатываемой заготовки и на ее поверхности распределение и величины радиальных, осевых, касательных и эквивалентных напряжений в любой момент времени и в любом объеме металла заготовки.

2. Данный метод позволяет выполнять сравнительный анализ достоинств и недостатков двух- и трехвалковой схем поперечно-винтовой прокатки, осуществляемой на универсальной рабочей клетке стана ПВП 20-60, в том числе при выполнении операций – прокатке сплошной заготовки, прошивке ее в гильзу, раскатки гильзы в трубу, редуцирование ее и др. (в данной работе из-за ограничительных требований к объему работы рассмотрены только результаты анализа прокатки сплошной заготовки).

3. Данный метод позволяет, применяя различные схемы прокатки (двух-, трех- и четырехвалковые) и, прикладывая различные внешние силы подпора или натяжения, или подпора плюс натяжения, регулировать и создавать в процессе прокатки любые вариации наперед заданного напряженного состояния металла заготовки с различными радиальными, осевыми, касательными и эквивалентными напряжениями, для последующего выбора

из всех вариантов наиболее экономичного, менее энергоемкого, наиболее производительного и т.п.;

4. Данный метод позволяет получать одинаковые напряженно-деформированные состояния заготовки при разных схемах прокатки, применяя и варьируя различные по сути внешние нагрузки (подпор и натяжения) и различные их абсолютные величины (рис. 51 б), (рис. 56 а), (рис. 63 б).

5. Применение данного метода позволяет в значительной степени сократить количество дорогостоящих и многочисленных экспериментальных прокаток, прошивок, раскаток, ограничиваясь контрольными единичными (разовыми экспериментами, целью которых должно быть только проверка правильности полученных этим методом предварительно выполненных расчетов).

6. Данный метод трехмерного конечно-элементного моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки может быть применим практически для всех металлов и сплавов на их основе в целях создания теоретической базы данных для возможных случаев их реализации в практической деятельности;

7. Данный метод позволяет, помимо расчетов параметров напряженно-деформированного состояния заготовки, выполнять оценку энергозатрат и производительности при поперечно-винтовой прокатке по различным схемам, а также расчет энергии формоизменения, работы внешних сил и мощности прокатки, а также расчет секундных объемов прокатываемого металла.

В разрезе выполняемого объема в данной работе (прокатка сплошной заготовки) анализ результатов, полученных с помощью метода трехмерного конечно-элементного моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки следует сделать выводы частного порядка:

а) прокатка при трехвалковой схеме обеспечивает большую суммарную пластическую деформацию заготовки по сравнению с двухвалковой схемой прокатки, что наглядно показано на рис. 49.

Причиной этого является различие напряженных состояний заготовки. Свободное уширение заготовки при двухвалковой прокатке приводит к оваллизации ее поперечного сечения на выходе из зоны максимального обжатия (рис. 49 а). При последующем проходе заготовки оваллизация несколько уменьшается, однако окончательный диаметр заготовки за счет перераспределения металла становится большим, чем заданный раствором рабочих валков размер. При прокатке по трехвалковой схеме уширение наблюдается существенно меньше, меньшее искажение формы поперечного сечения заготовки на выходе из зоны максимального обжатия (рис. 49 б) и, соответственно, меньшее отклонение полученного диаметра от заданного значения. Подтверждением этого факта служит то, что полученное в результате моделирования среднее значение диаметра заготовки после прокатки по трехвалковой схеме составило 92 мм, а после прокатки по двухвалковой схеме – 95 мм.

б) Представленные на рис. 49 результаты моделирования показывают, что стесненное уширение заготовки при трехвалковой схеме (рис. 49 б) прокатки способствует равномерному проникновению пластической деформации по сечению заготовки в очаге деформации (в зоне максимального обжатия заготовки по всему поперечному сечению равно $\varepsilon_{cp} \approx 0,4$). При прокатке по двухвалковой схеме (рис. 49 а) наблюдается неравномерность пластической деформации по сечению заготовки – поверхностные слои заготовки деформируются более интенсивнее, чем внутренние (на поверхности $\varepsilon_{cp} \approx 0,36$, а в центре заготовки $\varepsilon_{cp} \approx 0,26$).

в) Преимущественная пластическая деформация поверхностных слоев при двухвалковой прокатке приводит к возникновению значительных (до 227 МПа) растягивающих осевых напряжений σ_z в центральных слоях заго-

товки. При прокатке по трехвалковой схеме уровень напряжений σ_z в центральных слоях значительно ниже.

г) Величина контактного давления при прокатке по трехвалковой схеме почти в 1,5 раза ниже, чем при двухвалковой прокатке (324 МПа и 467 МПа).

д) В отличие от трехвалковой схемы при прокатке по двухвалковой схеме в центре заготовки действуют растягивающие радиальные напряжения, достигающие 350 МПа. Наличие именно этих напряжений совместно с растягивающими осевыми напряжениями способствует вскрытию внутренней полости при двухвалковой прокатке – прошивке.

е) В процессе моделирования в объеме данной работы выполнены расчеты энергии формоизменения, работы внешних сил и мощности прокатки, а также расчет секундных объемов прокатываемого металла. Результаты анализа показаны на рис.71–76

ж) Двухвалковая прокатка обладает по сравнению с трехвалковой прокаткой большей производительностью (рис. 77). Наибольшая производительность как при двухвалковой, так и при трехвалковой прокатке достигается при одновременном воздействии на заготовку подпора и натяжения (рис. 77).

з) Трехвалковая схема прокатки по энергозатратам оказывается более выгодным процессом по сравнению с двухвалковой прокаткой. Мощность прокатки по двухвалковой схеме примерно вдвое превышает мощность по трехвалковой схеме (рис. 78). При этом преимущество двухвалковой прокатки в производительности не может компенсировать ее энергоемкость, что наглядно иллюстрируется диаграммой удельных энергозатрат (рис. 79).

Повышенный расход энергии при двухвалковой прокатке может быть объяснен следующими факторами:

большой оваллизацией заготовки, приводящей к увеличению площади контактной поверхности металла с валком (рис. 49);

невыгодной схемой напряженного состояния, приводящей к росту контактного давления на рабочие валки;

дополнительными затратами энергии на многократную знакопеременную пластическую деформацию металла при «выглаживании» овала в очаге деформации.

к) Самым экономичным процессом из рассмотренных выше оказалась прокатка по трехвалковой схеме с натяжением (рис. 78).

Мощность прокатки (сплошная заготовка, без подпора/натяжения)

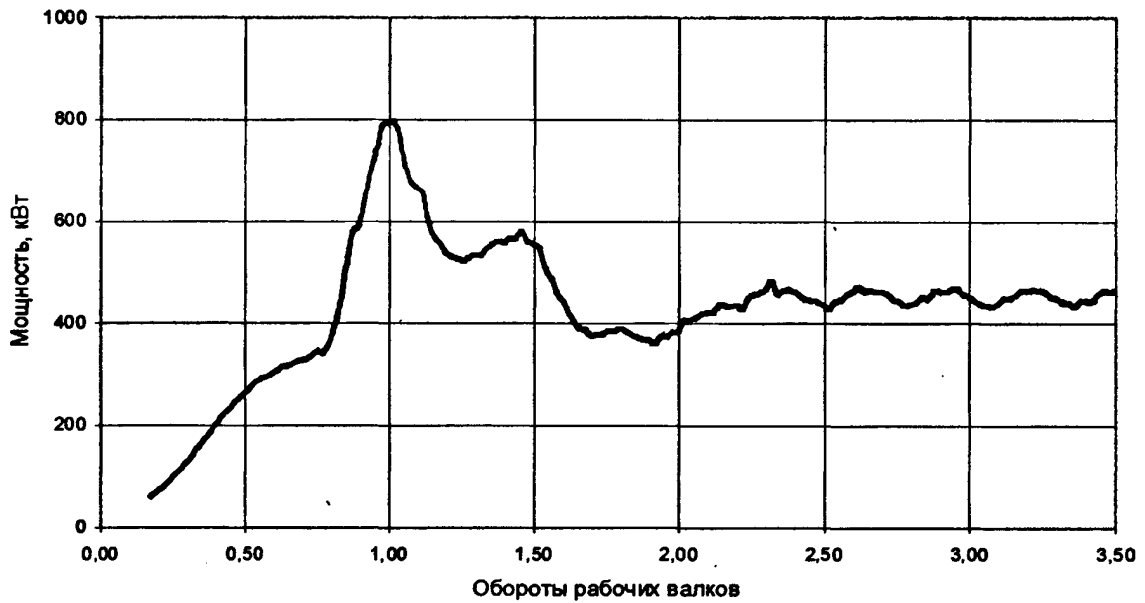


Рис. 71 График изменения мощности прокатки на стадии захвата (0...2 об. валка) и при установившемся режиме прокатки

Мощность формоизменения (сплошная заготовка, без подпора/натяжения)

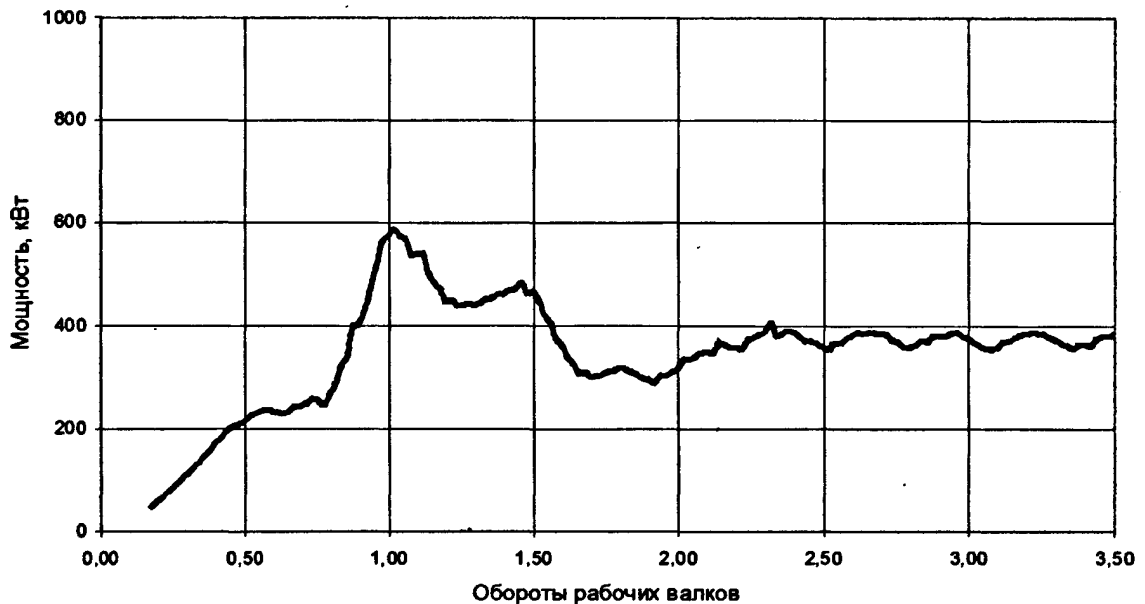


Рис. 72 График изменения мощности формоизменения на стадии захвата и при установившемся режиме прокатки

Объем металла, прокатываемый за 1 с в установившемся режиме, по результатам расчета составил $V_{сек} = 689893 \text{ мм}^3/\text{с}$, а мощность прокатки – $N_p = 450 \text{ кВт}$ (см. рис. 71).
Удельные энергозатраты:

$$W_{уд} = \frac{N_p}{\rho \cdot V_{сек}} \cdot 10^9 = \frac{450 \cdot 10^9}{8100 \cdot 689893} = 80,5 \text{ кДж/кг}$$

Мощность прокатки (сплошная заготовка, подпор)

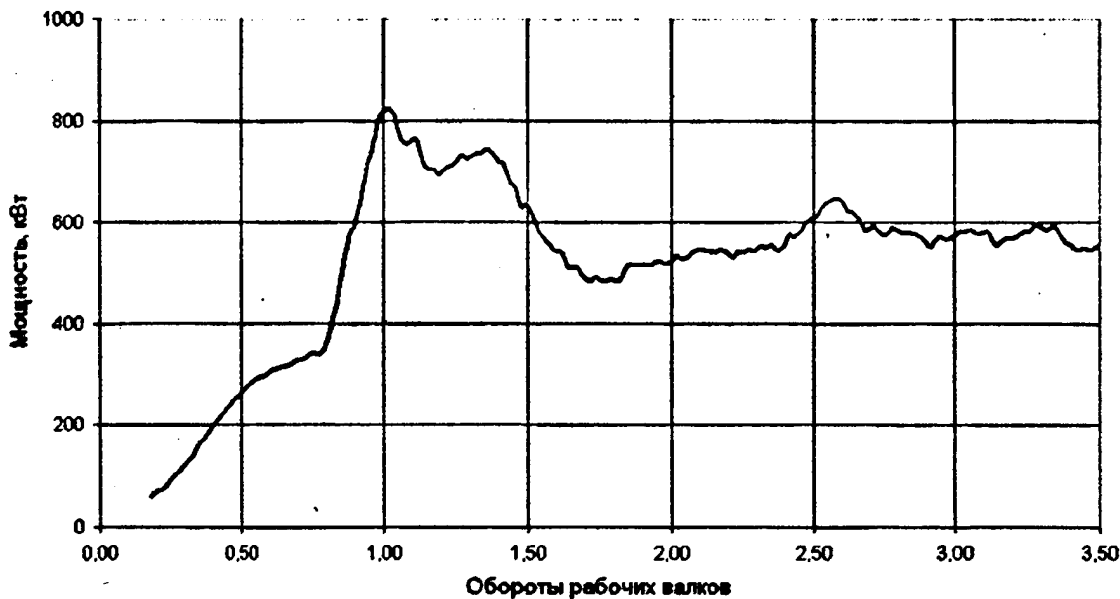


Рис. 73. График изменения мощности прокатки на стадии захвата (0...2 об. валка) и при установившемся режиме прокатки

Мощность формоизменения (сплошная заготовка, подпор)

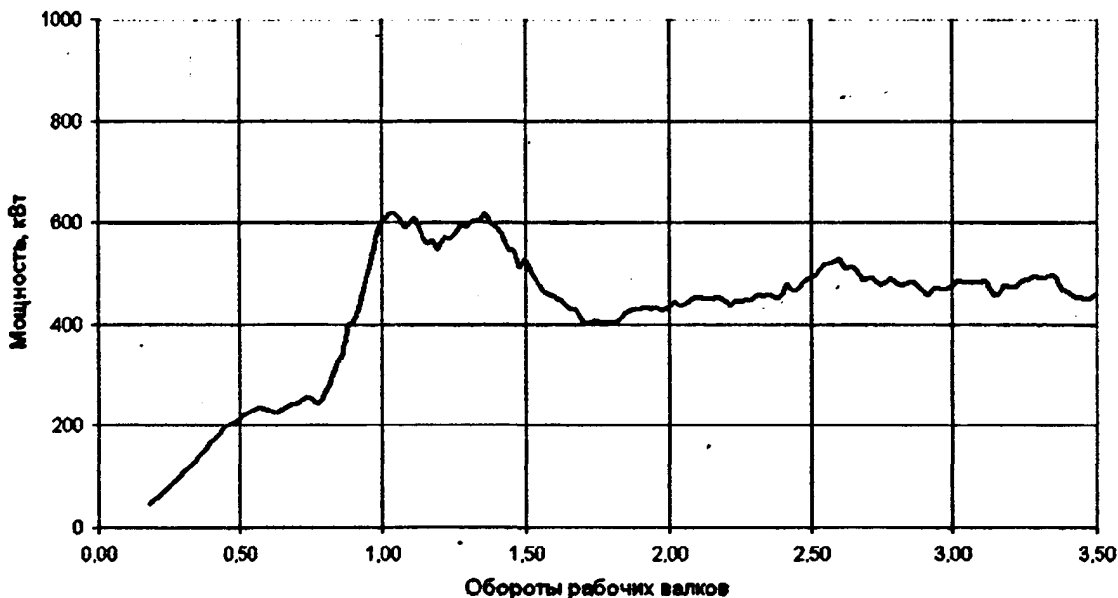


Рис. 74. График изменения мощности формоизменения на стадии захвата и при установившемся режиме прокатки

Объем металла, прокатываемый за 1 с в установившемся режиме, по результатам расчета составил $V_{\text{сек}} = 814300 \text{ мм}^3/\text{с}$, а мощность прокатки — $N_{\text{п}} = 570 \text{ кВт}$ (см. рис. 73). Удельные энергозатраты в этом случае могут быть определены по формуле:

$$W_{\text{уд}} = \frac{N_{\text{п}}}{\rho \cdot V_{\text{сек}}} \cdot 10^9 = \frac{570 \cdot 10^9}{8100 \cdot 814300} = 86,4 \text{ кДж/кг}$$

Мощность прокатки (сплошная заготовка, натяжение)

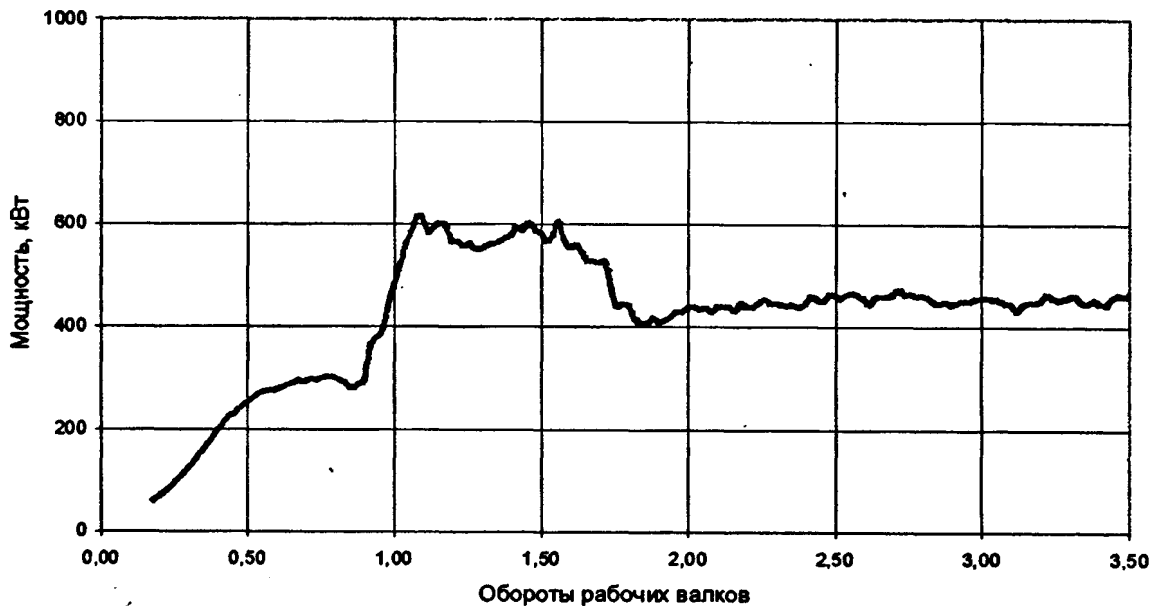


Рис. 75 График изменения мощности прокатки на стадии захвата (0...2 об. валка) и при установившемся режиме прокатки

Мощность формоизменения (сплошная заготовка, натяжение)

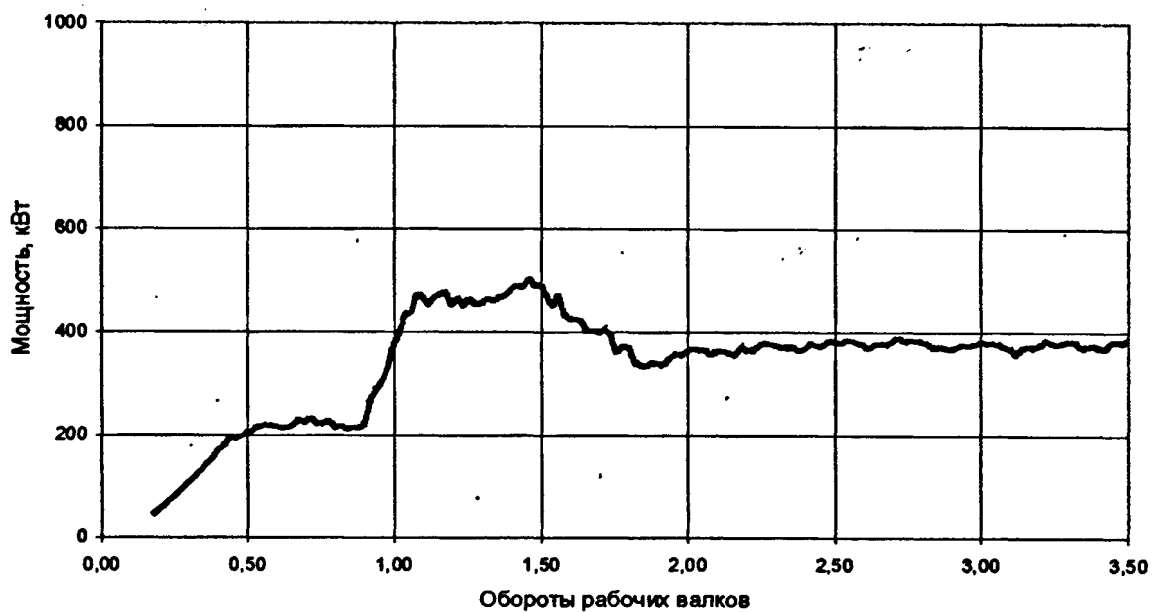


Рис. 76 График изменения мощности формоизменения на стадии захвата и при установившемся режиме прокатки

Объем металла, прокатываемый за 1 с в установившемся режиме, по результатам расчета составил $V_{сек} = 791681 \text{ мм}^3/\text{с}$, а мощность прокатки — $N_p = 450 \text{ кВт}$ (см. рис. 75).
Удельные энергозатраты:

$$W_{уд} = \frac{N_p}{\rho \cdot V_{сек}} \cdot 10^9 = \frac{450 \cdot 10^9}{8100 \cdot 791681} = 70,2 \text{ кДж/кг}$$

Производительность при прокатке круга 120x90 мм

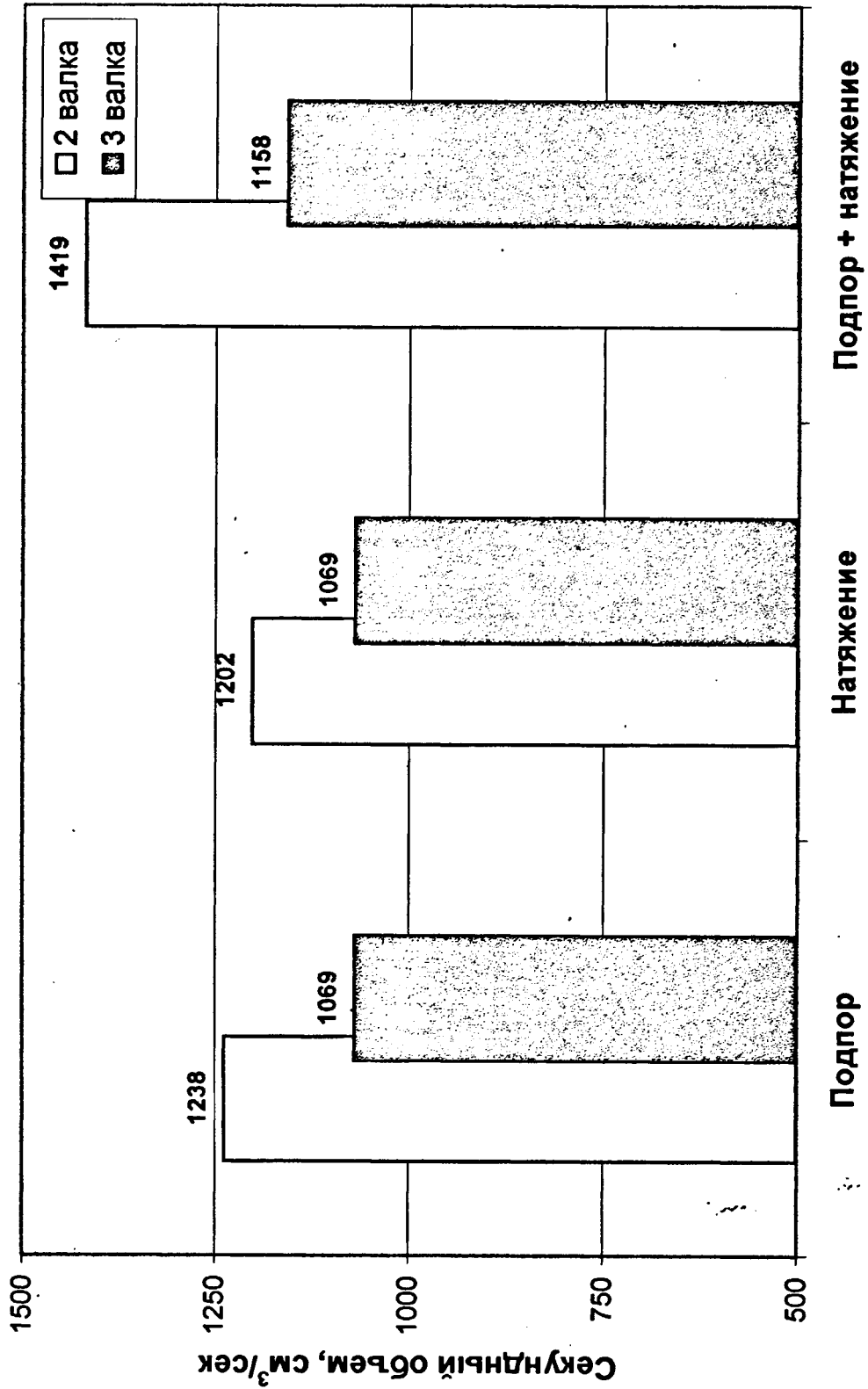


Рис. 77

Подпор Натяжение Подпор + натяжение

Мощность прокатки круга 120x90 мм

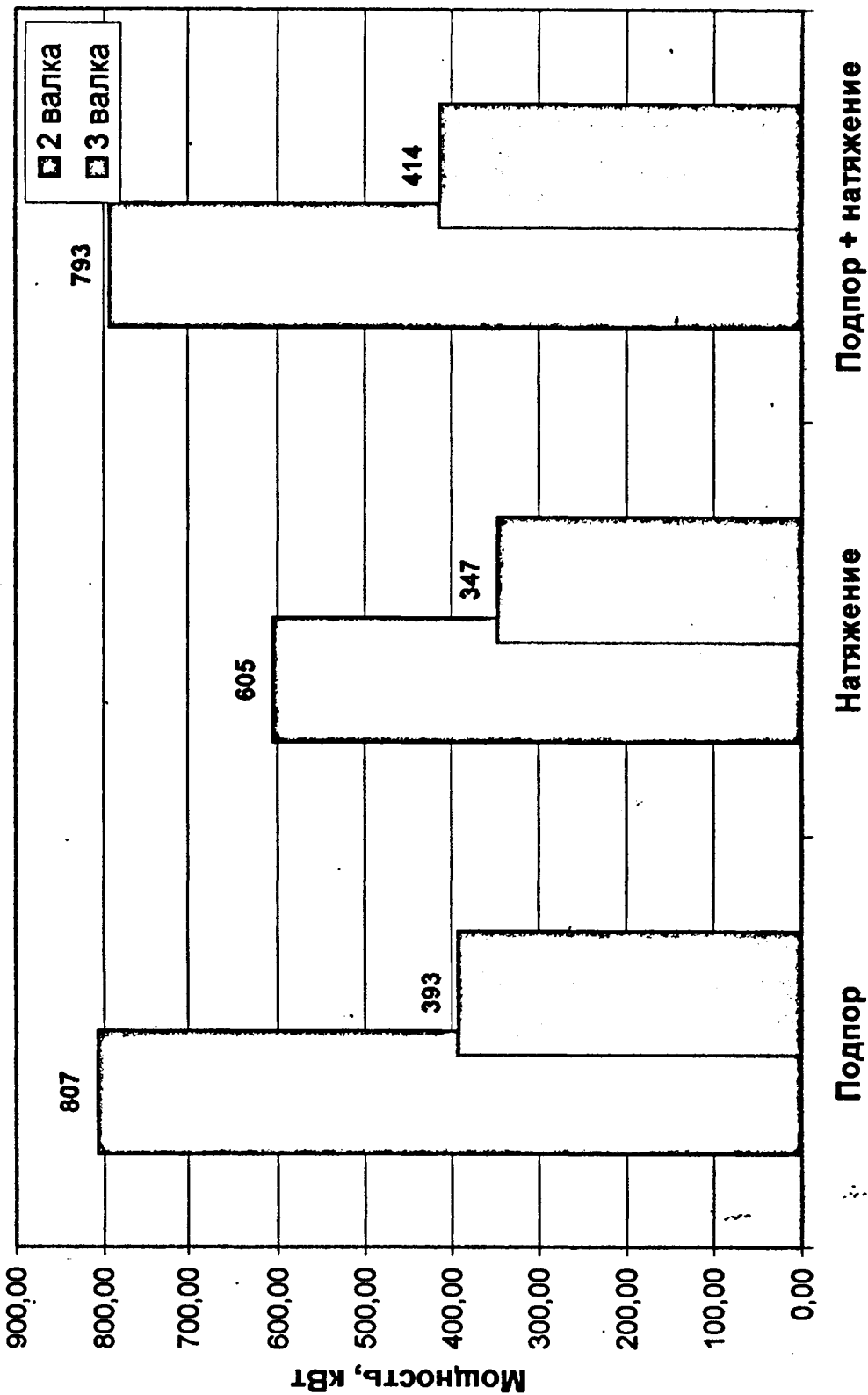


Рис. 78

Удельная работа при прокатке круга 120x90 мм

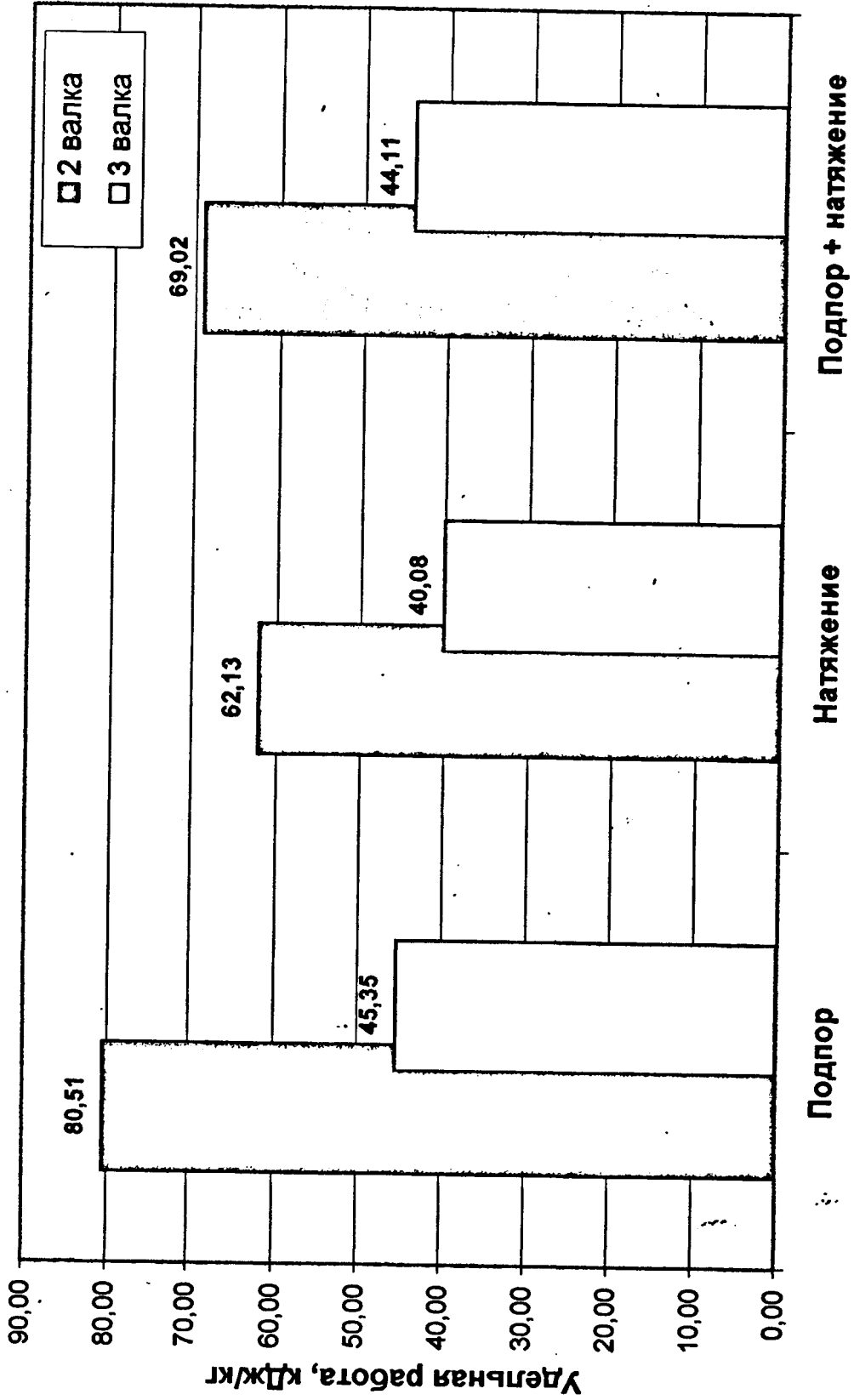


Рис. 79

Глава 5. Исследование и реализация оптимальных технологических режимов поперечно-винтовой прокатки на универсальном стане ПВП 20-60 для производства высококачественных деформированных полуфабрикатов из труднодеформируемых азвтектических силуминов

За время опытной эксплуатации стана ПВП 20-60 на первом этапе была освоена трехвалковая прокатка прутков из титановых и алюминиевых сплавов, специальных сталей отдельных марок, хромоникелевых сплавов.

Основная масса продукции – прутки диаметром от 100 до 50 мм, прокатываемые из стандартных заготовок диаметром 130 мм и длиной от 800 до 1000 мм. После реконструкции входной стороны стана [26] появилась возможность прокатывать заготовки большего диаметра – до 200 мм. Нагрев таких заготовок осуществлялся в камерной печи, с промежуточными подогревами. Величина деформации при прокатке заготовок большого диаметра ограничена допустимой нагрузкой на валки, на подшипники, шпиндели и электропривод, поэтому во время работы стана необходимо постоянно контролировать величину силы тока двигателей главного привода.

На универсальном стане ПВП 20-60 также обрабатывалась технология раскатки титановых труб из прессованной заготовки с обжатием по наружному диаметру и стенке. Трубы прокатывали на валках с безгребневой калибровкой. В качестве удерживающих раскатных оправок использовались прессовые иглы, что значительно сокращало расходы на инструмент.

Основной эффект такой технологической схемы – значительное уменьшение относительной разностенности труб – от 2-х до 3-х раз.

Все экспериментальные и опытные прокатки сопровождались исследованиями механических свойств, структуры, качества поверхности, влияние режимов обработки на образование дефектов [27-31].

При этом использовались различные способы выявления дефектов. Были проведены исследования таких дефектов прокатки, как скручивание прутков и труб во время прокатки, а также влияние поверхностных следов поперечно-винтовой прокатки (ПВП), как концентраторов напряжений при последующей обработке давлением [32].

В настоящем исследовании будет показано преимущество поперечно-винтовой прокатки как способа производства высококачественных деформированных полуфабрикатов на примере трудно деформируемых заэвтектических силуминов. Эти сплавы в последнее время начали широко применяться в производстве поршневой пары как материал с малым коэффициентом линейного расширения, повышенной жаропрочностью и износостойкостью.

Эта особая группа силуминов относится к сплавам типа естественных композитов, т.к. обладают двухфазной структурой, которая состоит из матрицы и избыточных первичных кристаллов кремния.

При этом большой интерес для ряда ведущих предприятий России, таких как, например, АО «Рыбинские моторы», представляет процесс изотермической штамповки поршней из заэвтектических силуминов из деформированной заготовки диаметром 70-80 мм с максимально модифицированной структурой и дисперсными первичными кристаллами кремния.

Чтобы решить эту проблему надо не только максимально измельчить структуру силуминов в процессе литья слитка, но и попытаться продолжить модифицирование в результате применения сложной системы деформации с помощью поперечно-винтовой прокатки литой заготовки.

Главной целью данного исследования является получение высококачественных прутков из заэвтектических силуминов для последующей изотермической штамповки поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

При проведении экспериментальной работы были использованы теоретические и конструкторские разработки, опубликованные ранее в работах [26, 32, 34].

5.1. Краткое введение

Обычно для производства деформированных полуфабрикатов из заэвтектических силуминов применяют процесс прессования [45].

Процесс горячего прессования алюминиевых сплавов и силуминов в том числе характеризуется реализацией в очаге деформации всестороннего сжатия. Это позволяет производить деформацию как легко, так и трудно деформируемых сплавов на основе алюминия. Правда, при прессовании мало пластичных (трудно деформируемых) сплавов наблюдается неравномерность истечения металла из очага деформации. Характер деформации определяется многими факторами, главные из которых являются пластичность литой заготовки (сплав), температура деформации, сложность инструмента и форма получаемого изделия, трение на контактной с инструментом поверхности. Последнее влияет на неравномерность деформации по сечению и длине, так как между скоростями истечения металла у поверхности и в центре деформации возникает градиент. Следствием этого градиента может быть неравномерность структуры и свойств прессованного изделия.

По сравнению с прокаткой, прессование отличается меньшей производительностью, большой величиной отходов (малый КИМ), сложностью изготовления и эксплуатации инструмента и соответственно большей себестоимостью деформированных изделий.

Следует указать, что по данным работы [38] горячее прессование заэвтектического силумина марки 01390 позволяет достичь достаточно высоких для такого малолегированного сплава механических свойств - предел прочности 200-210 МПа, предел текучести 120 МПа, удлинение и сужение соответственно 4 и 5%, ударную вязкость 4,6 кДж/м², модуль упругости 79 ГПа, предел выносливости 90 МПа.

Поперечно-винтовая прокатка (ПВП) является широко распространенным процессом обработки металлов давлением и отличается большим разнообразием способов, оборудования и выпускаемой продукции [23, 26, 46].

В производстве полуфабрикатов из алюминиевых сплавов ПВП пока находит весьма ограниченное применение. По существу в России находится только один агрегат ПВП, специально предназначенный для получения труб из алюминиевых сплавов [47]. Следует особо отметить, что основное применение ПВП относится именно к получению труб.

По результатам исследования ПВП алюминиевых сплавов можно составить ограниченное представление о технологических особенностях и параметрах прокатки. К этому следует добавить, что в литературе практически отсутствуют данные по ПВП заэвтектических силуминов, т.к. эти сплавы относятся к группе трудно деформируемых сплавов и обычно используются только в жидкофазной технологии, такой как фасонное литье, жидкая штамповка или штамповка в твердо - жидком состоянии [48-50].

В работе [47] при исследовании процесса ПВП стандартных алюминиевых сплавов АД1, Д16 и АМг было отмечено, что легированные сплавы типа Д16 перед прокаткой надо гомогенизировать, малолегируемые сплавы можно катать без отжига.

В то же время в литературе имеются информация о прокатке стандартных алюминиевых деформируемых сплавов. Так, обычную прокатку плит из эвтектического силумина СИЛ-1 осуществляли при

повышенных температурах 480-500°C, а поперечно-винтовую прокатку заготовок из алюминиевых деформируемых сплавов Д16 и В95 на стане ПВП проводили, наоборот, при пониженных температурах – до 300°C.

В работе [47] исследовали влияние концентрации легирующих элементов в сплавах типа Д1 и Д16 (в пределах ГОСТа) на технологическую пластичность при ПВП. На конических прутках диаметром от 38 до 48 мм было установлено, что повышение концентрации железа и кремния отрицательно сказывается на пластичности.

В работе [47] исследовали особенности деформирования при ПВП сплошных прутков из сплавов АМг6, АД31, Д1, Д16, В95 и В96ц. Известно, что эти сплавы относятся к разным системам алюминиевых сплавов и сильно отличаются по своим механическим свойствам. Исследования проводили при прокатке на 3-х валковой клетки ступенчатых заготовок после гомогенизации и обточки.

Исследовали 4 диапазона температуры от 255 до 415°C со скоростями прокатки от 0,17 до 0,58 м/с при постоянном угле подачи 12°. При этом вытяжка составляла от 1,44 до 6,25.

Были получены исключительно важные данные по связи между режимами ПВП и структурой прутков.

1. Обнаружена большая неравномерность макроструктуры по сечению прутков. Из-за влияния тангенциальной составляющей деформации по периферии прутка формируется более мелкое зерно по сравнению со структурой центральной зоны.

2. Установлен большой деформационный разогрев для трудно деформируемых высокопрочных сплавов В95 и В96ц.

3. Установлены граничные условия, когда в зоне перехода от мелкого зерна (на периферии) к крупному (в центре) могут образовываться кольцевые разрушения вплоть до вскрытия полости по центру заготовки.

Можно предположить, что при переходе от однофазных алюминиевых сплавов к двухфазным сплавам типа естественных композитов, каки-

ми являются заэвтектические силумины могут возникнуть дополнительные трудности.

Эти результаты побудили к проведению экспериментальной работы, в которой необходимо было опытным путем выбрать оптимальные параметры прокатки и оценить качество полученных при этом катаных прутков.

При этом имелись в виду следующие особенности деформации на прутки при ПВП в отличие от горячего прессования:

1. Циклический характер приложения деформирующих усилий, поскольку каждый элемент в процессе нахождения в очаге деформации (пластической зоне) подвергается многократному нагружению.

2. Незамкнутый калибр (инструмент) при прокатке на 3-х валках не обеспечивает полностью всестороннее сжатие металла при нахождении последнего в очаге деформации.

3. Усложненный характер деформации, когда силы трения, действующие в поперечном и продольном направлениях, не обеспечивают одинаковые по длине пластические зоны.

Это, в свою очередь, приводит к созданию в очаге деформации значительных сдвиговых деформаций, которые распределяются по сечению заготовки неравномерно. Так, на поверхности деформируемой заготовки эти сдвиговые деформации максимальные, а в центре - минимальны.

Указанная неравномерность деформации по сечению заготовки создает возможность развития в центре растягивающих напряжений, которые могут приводить к появлению в центральной зоне рыхлот.

Наконец, в зависимости от геометрии (формы) рабочих валков, при поперечно-винтовой прокатке на заготовку действуют скручивающие силы.

Существенное влияние на качество проката оказывает температура металла, величина, скорость деформации и связанный с этими параметрами нестабильный деформационный разогрев, а также дробность деформации (число переходов).

Следует указать, что, несмотря на перечисленные выше особенности технологии ПВП, этот процесс выгодно отличается от других средств деформации металла высокой производительностью, малой величиной отходов - высоким коэффициентом использования металла (КИМ), простотой технологического инструмента в изготовлении и наладке, универсальностью и относительно низкой себестоимостью.

Анализ литературных данных по технологии литья и деформации трудно деформируемых заэвтектических силуминов показывает, что при оптимизации процесса технологии литья слитков и модифицировании структуры можно добиться существенного измельчения структуры и уменьшения размеров первичных кристаллов кремния [48-50].

Однако применение поперечно-винтовой прокатки может дать возможность дополнительного измельчения структуры заэвтектических силуминов и, в частности, кристаллов первичного кремния. Этот структурный эффект может появиться в результате применения усложненной схемы деформации путем поперечно-винтовой прокатки.

5.2. Материал и методика проведения исследований

5.2.1. Использованные материалы

Как уже указывалось выше для проведения исследований были выбраны трудно деформируемые заэвтектические силумины марки 01390 и 01391 (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав сплавов 01390 и 01391

Марка сплав	Легирующие компоненты и примеси. %								
	Si	Mn	Cu	Mg	Ti	Zr	Fe	P	Прочие
01390	17-	0,3-	менее	менее	менее	-	менее	менее	менее
	19	0,8	0,5	0,5	0,15		1,5	0,1	0,1
01391	19-	менее	менее	менее	менее	менее	менее	менее	менее
	20	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3	2,0	0,1	0,1

Если сплав 01390 получали простым синтезом компонентов, то сплав 01391 получали путем разбавления высококремнистой лигатуры АК90 производства Запорожского алюминиевого комбината (ЗАЛКа), получаемой методом углетермического восстановления дешевого сырья типа нефелинов, алунигов и каолинов [48-50].

Следует указать, что в исследованиях ВИЛСа путем прецизионного химического анализа в лигатуре АК90 были обнаружены следы (менее 0,01%) до 40 активных металлов из числа модификаторов, таких как В, Sc, Та, Sr, Ве, Li, К, Na, S ряд других. Присутствие этих модификаторов должно положительно сказаться на измельчении структуры слитков, особенно при применении ультразвуковой обработки расплава [48-50].

5.2.2. Технология непрерывного литья и модифицирования структуры слитков сплавов 01390 и 01391

Для проведения поперечно –винтовой прокатки в опытной литейной ВИЛСа* было проведено несколько опытных плавов сплавов 01390 и 01391 (табл. 4).

Для модифицирования первичных кристаллов кремния в расплав (в печи) вводили фосфор с помощью двойной лигатуры Fe-P в количестве 0,02-0,06%.

В процессе литья перегретый до 750-800 °С расплав обрабатывали в желобе ультразвуком по рекомендациям [48-50].

Для усиления эффекта измельчения кристаллов первичного кремния в плавках 3-193 и 3-194 ультразвуковую обработку (УЗО) совмещали с дополнительным введением в расплав 0,005-0,06%P при помощи лигатурного прутка состава Al-Fe-P.

**Исследования проводили по программе научно-технического сотрудничества между ОАО «Цветметобработка» и ОАО «ВИЛС» от 21 декабря 2001года.*

Таблица 4

Номера плавки, размеры и химический состав опытных слитков сплавов 01390 и 01391

Сплав	№ плавки	Диаметр слитка, мм	Si	Mg	Fe	Ti	Zr
01390	3-575	178					
	3-576	178					
	3-193	114	17,1	0,26	1,1	0,16	-
01391	3-194	114	19,8	0,05	1,89	0,58	0,11

В табл. 5 представлены результаты металлографического анализа по кремнию подготовленных для прокатки слитков. На рис. 81 представлены соответственно кривые распределения кристаллов кремния в слитках, а на рис. 83 – характерные микроструктуры отлитых слитков.

Таблица 5

Средние и максимальные размеры первичных кристаллов кремния в слитках сплавов 01390 и 01391, подготовленных для поперечно-винтовой прокатки

№ плавки	P, %	УЗО	Средний размер Si, мкм	Максимальный размер Si. мкм
3-575	0,03	+	30-40	100
3-576	0,05	+	30-40	100
3-193	0,02	-	20-30	90
3-193	0,02 + 0,005	+	10-20	40-50
3-194	0,06	-	30-40	100
3-194	0,06 + 0,004	+	20-30	60-80

Перед проведением прокатки все слитки разрезали на заготовки длиной 300-500 мм, обтачивали на 10-15 мм и гомогенизировали по режиму 450-470 °С в течение 3 ч.

5.2.3. Методика проведения поперечно-винтовой прокатки

Поперечно-винтовую прокатку литых заготовок из заэвтектического силумина 01390 проводили на разработанном универсальном прокатном стане ПВП-20-60 [18, 21, 26] со следующими основными параметрами настройки:

- число валков—3;
- диаметр валков (D_v)—275 мм;
- угол раскатки β —4° ;
- угол раствора валков γ —14°;
- угол подачи α —0-12°, при этом 9° для пл.575 и 576 и 6° —для пл. 193 и 194;
- тангенциальное смещение валков—15 мм;
- диаметр прокатываемых прутков—50-110 мм;
- диаметр заготовки— до 165 мм;
- частота вращения валков n_v —35 об/мин. (пл. 576 и 575) и 40 об/мин (пл .193 и 194);
- нагревательное устройство—печь сопротивления мощностью 180 кВт.

В процессе ПВП меняли размеры и температуру нагрева заготовок, величину деформации за счет диаметра заготовки и последовательного изменения диаметра прутков и скорости деформации за счет изменения угла подачи.

Рабочие (технологические) параметры поперечно винтовой прокатки составили:

- окружная скорость валков $V_{окр.} = D_v \times n_v$ —0,5 м/с;
- осевая скорость на валках $V_o = V_{окр.} \times \sin \alpha$ —0,08 м/с.
- скорость деформации 1, 5 с⁻¹ (пл. 575 и 576) и 1,0 с⁻¹ (пл.193-194)

В табл. 6 представлены опытные режимы прокатки заэвтектических силуминов марки 01390 и 01391.

В результате анализа режимов прокатки в сопоставлении с результатами наружного осмотра прутков и макроструктуры в долевом и поперечном направлении, микроструктуры можно отметить следующие предварительные выводы:

1. Только переход на режимы прокатки в соответствии с выбранным в результате компьютерного моделирования коридором (см. главу 4) и степенями деформации более 40% позволяет получить плотную структуру прутков без рыхлот в центральной зоне.

2. Особенно существенное значение, как показывают наши эксперименты, оказывает температура прокатки. В этом смысле проведенные ранее исследования по выбору для поперечно-винтовой прокатки серийных деформированных сплавов Д16 (2124) и В95 (7075) температуры в 300-350 °С оказались неприемлемыми.

Так, понижение температуры прокатки до 380 °С привело к разрушению прутков при деформации, а повышение температуры до 450 °С позволило получить целые прутки с рыхлотой в центре.

Только дальнейшее повышение температуры прокатки до 470 °С исключило появление рыхлоты и позволило получить плотный металл по всему сечению с прекрасным качеством поверхности.

3. Кроме температуры на плотность прутков большое значение оказывает также скорость прокатки. Несмотря на стремление повысить производительность процесса поперечно-винтовой прокатки, по нашим данным, для труднодеформируемых заэвтектических сплавов желательно скорость деформации ограничить 1,0 м с⁻¹.

5.2.4. Методика исследования структуры слитков и катаных прутков

От слитков и катаных прутков отбирали поперечные темплеты, из которых изготавливали микрошлифы. На шлифах методами количественной металлографии определяли средние и максимальные размеры первичных кристаллов кремния. В отдельных, наиболее типичных случаях, кроме определения средних и максимальных размеров строили кривую распределения первичных кристаллов кремния.

Таблица 6

Параметры прокатки заэвтектических силуминов и оценка качества прокатанных прутков

№ слитка / сплав	Темп-ра прокатки, °С	№ пере-хода	Диаметр прутка, мм	Вытяжка за переход	Дефор-мация за переход, %	Суммар-ная вытяжка	Суммар-ная дефор-мация, %	Качество проката
575 01390	450	1	130	1,61	38	-	-	рыхлость в центре
	«»	2	94,5	1,9	47	3,05	67	«»
575 01390	«»	1	130	1,61	38	-	-	«»
	«»	2	72,5	3,2	69	5,18	81	«»
576 01390	«»	1	130	1,61	38	-	-	«»
	«»	2	94,5	1,9	47	3,06	67	«»
	«»	3	57,5	2,7	63	8,23	88	«»
575 01390	380	1	116	2,02	50	-	-	захожен, застрял и рассыпался
	«»	2	80	2,1	52	4,24	76	отвалился конец
575 01390	400-420	1	110	2,25	55	-	-	частично плотный металл*
	380	2	75	2,15	53	4,84	79	развалился на 2 части из-за перекоса в валках
576 01390	400-420	i	110	2,25	55	-	-	«»
193 01390, 193-1-1	490-500	диам. слитка 100 мм	70	2,04	51	2,04	51	хороший, но отвалится передн. конец на 2-м переходе
193 01390, 193-2-2	«»	«»	60	2,78	64	2,78	64	хороший
193 01390, 193-3-2	«»	«»	80	1,56	36	1,56	36	хороший
193 01390, 193-1-1	«»	«»	70	2,04	51	2,04	51	хороший, но отвалился передн. конец из-за перекоса на 2-м переходе
194 01391, 194-1-1	«»	«»	70	2,04	51	2,04+	36	хороший
			50	1,96	49	1,96= 4		
194 01391, 194-1-2	«»	«»	60	2,78	64	2,78	64	хороший

5.3. Результаты исследования структуры катаных прутков

1. Сплав 01390

Как представлено в табл. из слитков сплава 01390 диам. 178 и 114 мм (заготовки соответственно—165 и 100 мм) получали путем дробной ПВП прутки диам. 110-50 мм. В зависимости от суммарной степени деформации, полученной металлом в результате применения нескольких переходов, структура силуминов претерпевает дополнительные серьезные изменения.

О сложной деформационной картине при ПВП свидетельствует макроструктура так называемых очагов деформации (переход от слитка к прутку или от большего диаметра прутка к меньшему) и самих прутков (рис. 80).

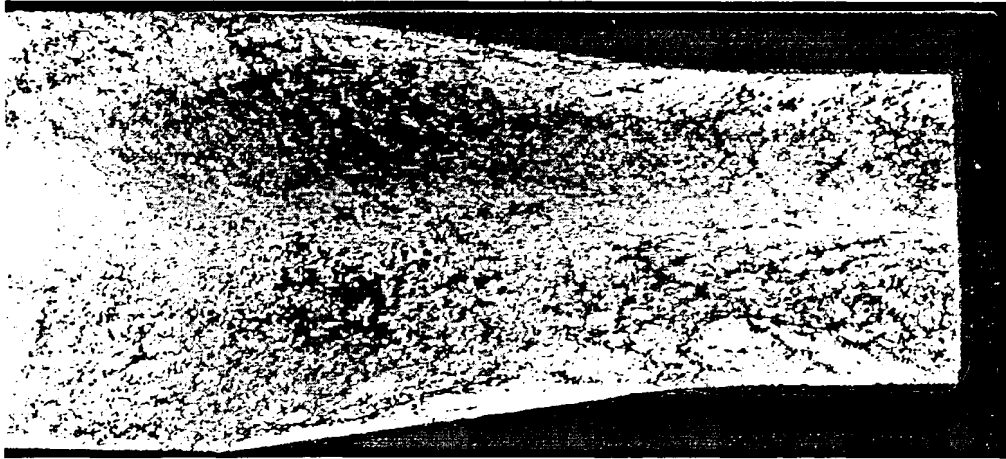
Этот сложный механизм «перемалывания» структурных составляющих сплава заметно отражается прежде всего на размерах и форме кристаллов первичного кремния.

В табл. 7 представлены результаты измельчения кристаллов первичного кремния в зависимости от степени суммарной деформации.

Таблица 7

Влияние суммарной степени деформации при ПВП на размеры кристаллов первичного кремния в прутках сплава 01390

Диаметр прутка, мм	Суммарная деформация, %	Средний размер кристаллов Si, мкм	Максимальный размер кристаллов Si, мкм
<i>Исходный немодифицированный слиток диаметром 178 мм (после обточки 165 мм) со средними размерами кристаллов кремния 30-40 мкм и максимальными размерами до 100 мкм</i>			
130	38	30-40	60-100
94,5	47	20-30	60-80
72,5	69	20-30	70
57,5	50	20-30	60
<i>Исходный модифицированный слиток диаметром 114 мм (после обточки 100 мм) со средними размерами кристаллов кремния 20-30 мкм и максимальными размерами до 70 мкм</i>			
70	51	10	20-30
60	64	10-15	25-30
<i>Исходный слиток диаметром 114 мм (после обточки 100 мм) после комплексного модифицирования со средними размерами кристаллов кремния 10-30 мкм и максимальными размерами 40-50 мкм</i>			
70	51	10-15	20-30
60	64	10-20	30-40



а)



б)



в)

Рис. 80 Макроструктура ($\times 1,0$) очагов деформации при переходе от обточенного слитка диаметром 100 мм к прутку диаметром 70 мм (а) и от прутка диаметром 70 мм к прутку диаметром 50 мм (б), а также прутка диаметром 50 мм (в).

На рис. 81, 82 представлены кривые распределения кристаллов первичного кремния по размерам в прутках после поперечно-винтовой прокатки как из литых заготовок с модифицированной структурой, так и из заготовок с грубой немодифицированной структурой. Соответственно на рис. представлены типичные структуры заготовок и прутков.

Анализ этих данных позволяет утверждать, что деформация методом ПВП оказывает весьма существенное влияние на размеры первичных кристаллов кремния в сплаве 01390. Так, если деформация не превышает 40% (вытяжка 1,61) структура прутка практически не отличается от структуры исходной литой заготовки. Увеличение степени деформации до 47-69% позволяет в 1,5-2 раза уменьшить средний размер кристаллов кремния. При этом максимальные размеры встречающихся в структуре отдельных кристаллов кремния остается достаточно большим — 60-80 мкм.

Интересные данные получены при использовании литых заготовок с модифицированной структурой в процессе литья. Даже в этом случае применение ПВП дополнительно модифицирует структуру прутка. Результаты исследования показывают, что при ПВП средний размер кристаллов первичного кремния становится равным 10-15 мкм, при этом максимальный размер отдельных кристаллов не превышает 40 мкм.

В качестве дополнительного эффекта при ПВП можно отметить влияние дополнительных нагревов при прокатке на измельчение эвтектической основы сплава.

2. Сплав 01391

Как представлено в табл. 6 из слитков сплава 01391 диам. 114 мм (заготовка соответственно—100 мм) получали путем дробной ПВП прутки диам. 75-50 мм. В зависимости от суммарной степени деформации, полученной металлом в результате применения нескольких переходов, структура силуминов претерпевает дополнительные серьезные изменения.

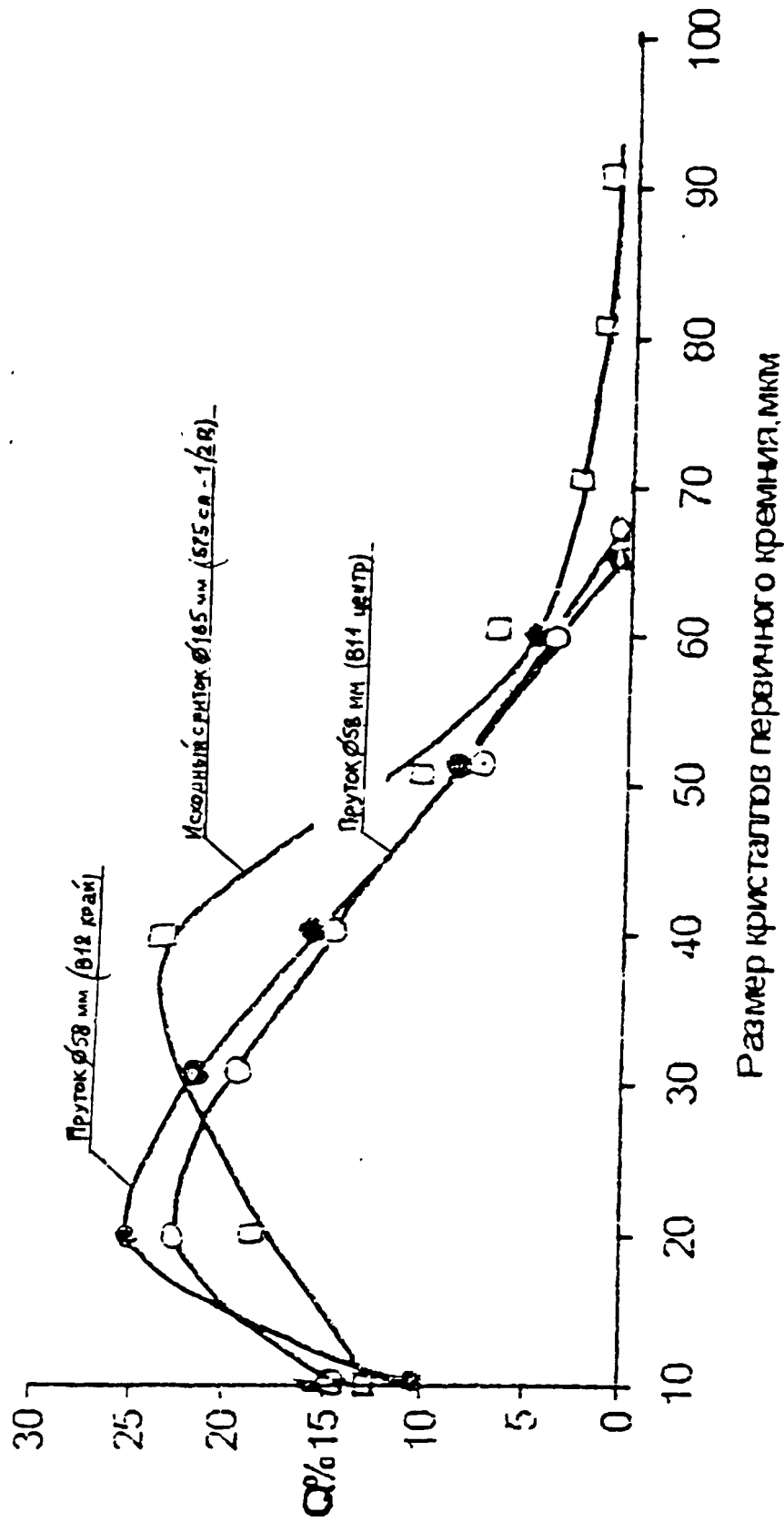


Рис. 81. Влияние деформации при поперечно-винтовой прокатке на эффективность измельчения кристаллов первичного кремния в заэвтектическом сплаве 01390 (18% Si) (литая обточечная заготовка диаметром 165 мм с немодифицированной структурой и пруток диаметром 58 мм после деформации 61%).

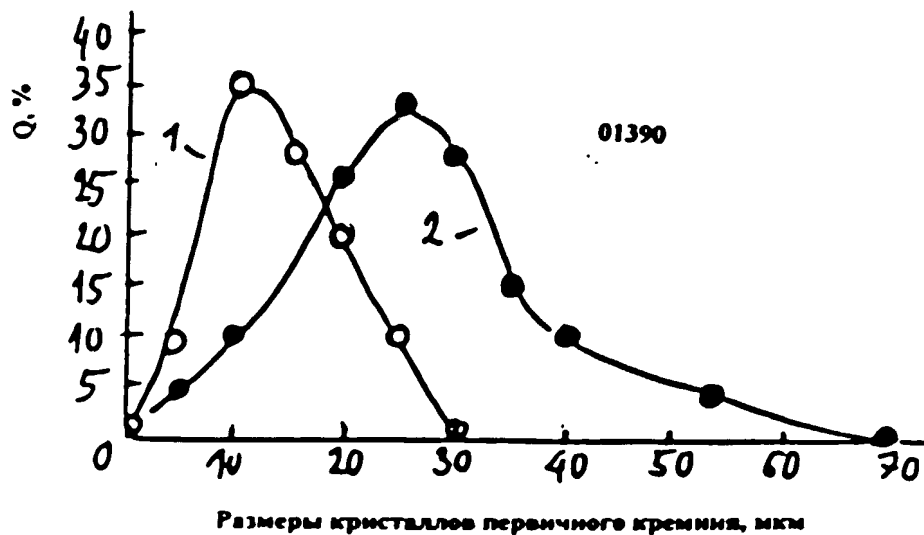


Рис. 82 Влияние деформации при поперечно-винтовой прокатке на эффективность измельчения кристаллов первичного кремния в заэвтектических силуминах 01390 (18% Si) и 01391 (20% Si):
 1 – прутки диаметром 70 мм (степень деформации 51%);
 2 – литая обточенная заготовка диаметром 100 мм с модифицированной структурой

В табл. 8 представлены результаты измельчения кристаллов первичного кремния в зависимости от степени суммарной деформации.

Таблица 8

Влияние суммарной степени деформации при ПВП на размеры кристаллов первичного кремния в прутках сплава 01391

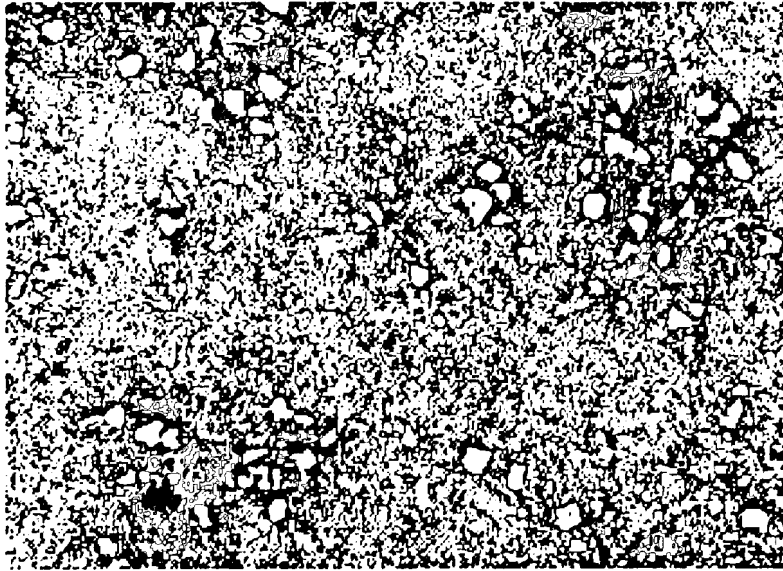
Диаметр прутка, мм	Суммарная деформация, %	Средний размер кристаллов Si, мкм	Максимальный размер кристаллов Si, мкм
<i>Исходный немодифицированный слиток диаметром 114 мм (после обточки 100 мм) со средними размерами кристаллов кремния 30-40 мкм и максимальными размерами до 100 мкм</i>			
60	64	10-15	30
<i>Исходный слиток диаметром 114 мм (после обточки 100 мм) после комплексного модифицирования со средними размерами кристаллов кремния 20-30 мкм и максимальными размерами 60-80 мкм</i>			
70	51	15-20	30-40
50*	49	30-40	60-70

На рис. 82 представлены кривые распределения кристаллов первичного кремния в литой заготовке и прутке диаметром 70 мм после ПВП, а на рис. 83,84 типичные микроструктуры.

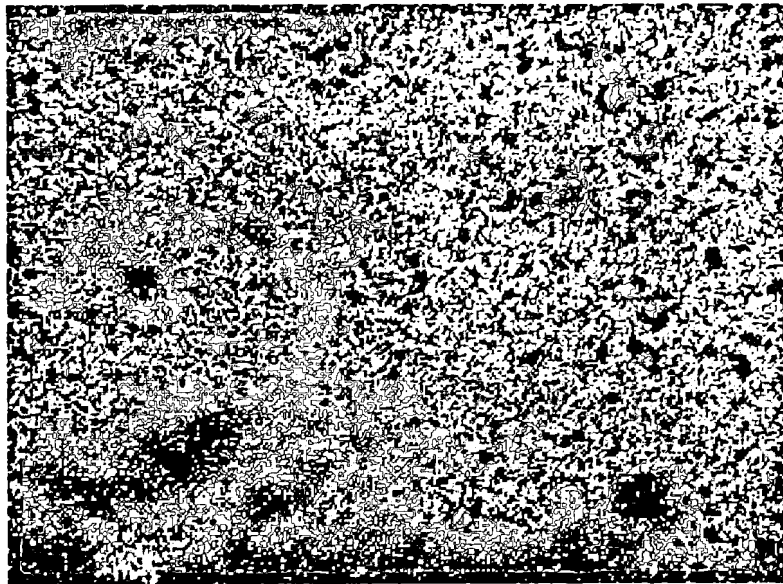
Анализ табличных данных и рис. показывает исключительно сильное влияние ПВП на структуру деформированного металла. В сплаве 01391 имеется достаточно высокие концентрации кремния, железа и титана, что приводит к формированию в структуре грубых избыточных фаз—первичных кристаллов кремния и алюминидов железа. И, хотя при литье удастся несколько уменьшить их размеры и облагородить структуру, однако их размеры остаются все-таки достаточно большими.

Применение ПВП позволяет и в этом случае существенно повлиять на структуру прутка. При оптимальных параметрах прокатки и степени деформации 50-60% средний размер кристаллов первичного кремния уменьшается в 2-3 раза, при этом максимальные размеры отдельных кристаллов не превышают 25-40 мкм. Одновременно с этим грубые пластинчатые кристаллы алюминидов железа (рис. 84 а,в) в слитке ломаются после ПВП, образуя достаточно мелкие пластинки (рис. 84 б,г), при этом также измельчается эвтектическая основа сплава.

*дефекты в виде несплошностей из—за торможения процесса прокатки



а)



б)

Рис. 83. Влияние поперечно - винтовой прокатки на микроструктуру слитков заэвтектического силумина марки 01390:
а - слиток диам. 114 мм (средний размер кристаллов кремния 20 мкм, $\times 125$);
б - пруток диам. 70 мм (средний размер 10 мкм, $\times 200$).

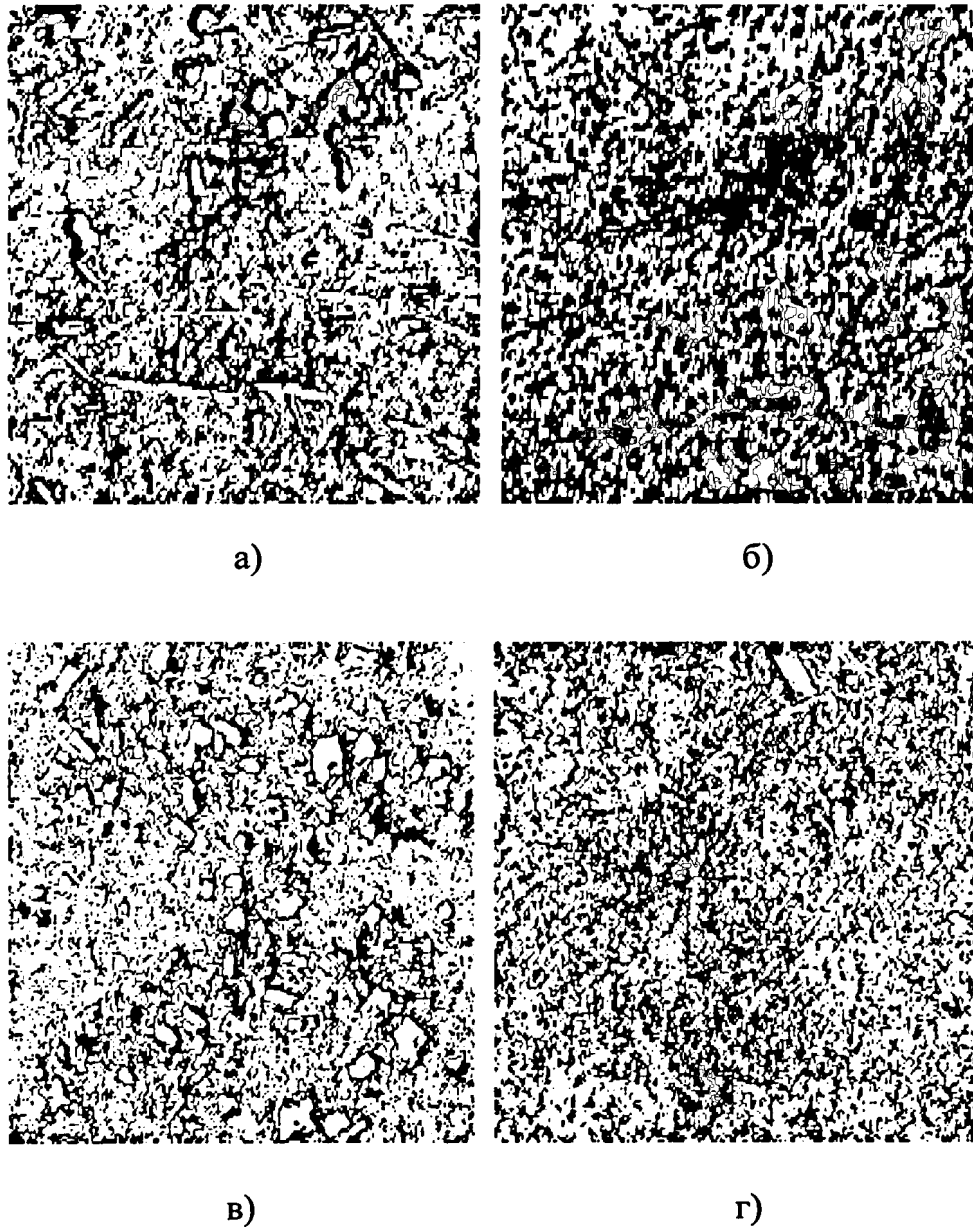


Рис. 84. Влияние поперечно - винтовой прокатки на микроструктуру слитков заэвтектического силумина марки 01391:

а - слиток диам. 114 мм (средний размер кристаллов кремния 25 мкм, крупные кристаллы алюминиды железа, 125);

б - то же, х 500;

в - пруток диам. 70 мм (средний размер кристаллов кремния 10 мкм, х 125);

г - то же, х 500.

5.4. Выводы

1. Проведенные исследования показали большую перспективность применения технологии ПВП для улучшения структуры прутков из эвтектических силуминов. Эта технология может обеспечить получение прутков с максимально измельченной структурой для изотермической штамповки поршней применительно к задачам, поставленным компанией «Рыбинские моторы».

2. Если комплексная технология модифицирования структуры слитков из сплавов 01390 и 01391 с применением ультразвуковой обработки расплава позволяет уменьшить средние размеры кристаллов первичного кремния до 20-40 мкм, то последующее применение ПВП снижает эти размеры до 10-15 мкм.

3. Важным показателем эффективности применения ПВП является также ограничение размеров отдельных крупных кристаллов кремния. Так, если в слитках максимальные размеры первичных кристаллов кремния достигают 60-100 мкм, то после ПВП их размеры не превышают 40 мкм и в отдельных случаях 25-40 мкм.

4. В результате проведенных исследований показано, что даже для более легированного сплава 01391, в котором содержится повышенная концентрация кремния (20%), железа (до 1,5%) и титана (до 0,5%), применение ПВП обеспечивает получение измельченной модифицированной структуры с дисперсными кристаллами первичного кремния и алюминидов железа и титана.

5. Проведение в процессе прокатки дополнительных нагревов (450-470°C, 3 ч.) и определенный разогрев в процессе деформации способствует измельчению эвтектической основы сплавов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Впервые в мировой практике создана конструкция универсальной рабочей клетки (в трех вариантах) для станов поперечно-винтовой прокатки, позволяющая поочередно осуществлять операции "прокатка-прошивка-раскатка" по двух-, трех- и даже четырехвалковой схемам с помощью одной станины и кассетной перевалки рабочих валков, с целью реализации преимуществ каждой схемы на одной рабочей клетки.
2. Каждый из вариантов конструкции универсальной рабочей клетки стана поперечно-винтовой прокатки защищен авторскими свидетельствами СССР на изобретения.
3. Конструкция универсальной рабочей клетки стана поперечно-винтовой прокатки позволяет, помимо гладких изделий, изготавливать изделия периодического профиля, т.е. с изменением наружного диаметра по длине прокатываемого прутка, а также полых изделий с различными наружными и внутренними диаметрами по длине этих изделий и обеспечивать гибкую технологию производства малотоннажной широкономенклатурной продукции.
4. Стан ПВП 20-60 изготовлен в металле, смонтирован и эксплуатируется на заводе легких сплавов ВИЛС, обеспечивая промышленные и опытные прокатки спецсплавов.
5. Созданный универсальный стан поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 позволяет сравнивать достоинства и недостатки различных схем прокатки-прошивки-раскатки (двух- и трехвалковую) при совершенно одина-

ковых технических и технологических условиях и определять выбор целесообразной технологии.

6. Применяя в процессе прокатки на стане ПВП 20-60 действие механизмов подпора и натяжения, которые изготовлены в составе стана, можно составлять различные схемы напряженно-деформированного состояния прокатываемого изделия с целью достижения наиболее благоприятных условий технологического процесса прокатки (минимальные энергозатраты, наибольшую производительность, лучшее качество поверхности и т.п.).
7. Конструкция универсальной клетки стана ПВП 20-60 способна обеспечить (помимо классических операций прокатка-прошивка-раскатка) производство изделий специального машиностроительного назначения (шары, втулки, штифты, изделия с винтовой поверхностью, ребристые трубы).
8. Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при прокатке по двух- и трехвалковой схемам с применением метода трехмерного конечно-элементного моделирования.
9. Установлено, что:
 - прокатка по трехвалковой схеме обеспечивает большую суммарную пластическую деформацию заготовки;
 - стесненное уширение заготовки при трехвалковой схеме прокатки способствует равномерному проникновению пластической деформации по сечению заготовки в очаге деформации;

- величина контактного давления при трехвалковой схеме прокатки в 1,5 раза ниже, чем при двухвалковой прокатке (324 МПа и 467 МПа - соответственно).
10. Расчет и оценка энергозатрат и производительности при поперечно-винтовой прокатке по обеим схемам показал, что энергозатраты при трехвалковой схеме прокатки меньше, чем при двухвалковой, из-за меньших затрат энергии на знакопеременные радиальные деформации.
 11. Определены технологические параметры поперечно-винтовой прокатки на стане ПВП 20-60 для производства высококачественных деформированных полуфабрикатов из трудно-деформируемых заэвтектических силуминовых сплавов 01390 и 01391 с резким снижением в 5-6 раз размеров кристаллов первичного кремния в структуре прокатанных прутков.
 12. Установлено, что промышленно осуществимо производство высококачественных заготовок в виде прутков с обработкой поперечно-винтовой прокаткой вместо прессования из заэвтектических силуминовых сплавов.

Список литературы

1. Емельяненко П.Т. Теория косо́й и пилигримовой прокатки. –М.: Металлургиздат, 1949. –491 с.; ил.
2. Смирнов В.С. Поперечная прокатка. –М.: Машгиз, 1948. –195 с.; ил.
3. Трехвалковые прошивные станы: Обзор / И.Г. Гетия, Л.Н. Скоробогатская, М.А. Левшунов и др. –М.: Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований черной металлургии, 1975. –21 с.; ил.
4. Лисочкин А.Ф. Поперечная прокатка // Сталь. –1946. –№.6. –С. 378-385.
5. Дубровский И.В., Матлахов Л.И. Расположение оправки и образование плен на трубах // Сталь. –1947. –№.7. –С. 626-629.
6. Смирнов В.С. Поперечная прокатка в машиностроении. –М.: Машгиз, 1957. –375 с.
7. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. –М.: Металлургиздат, 1962. –494 с.
8. Казанская И.И., Милютин С.П. Трехвалковые станы с подпором // Металлургическое машиностроение / НИИИНФОРМТЯЖМАШ. – 1965. –№.3. –С. 13-20.
9. А.с. № 214478 СССР, МКИ В21в. Рабочая клеть трехвалкового прошивного стана / И.К. Тартаковский, П.М. Финагин, П.И. Полухин и др. // Открытия, промышленные образцы, товарные знаки. –1968. –№. 12.
10. Целиков А.И., Зюзин В.И. Современное развитие прокатных станов. –М.: Металлургия, 1972. –399 с.; ил.

11. Трехвалковые станы винтовой прокатки для производства периодических профилей круглого сечения / А.И. Целиков, В.А. Жаворонков, И.К. Шафран и др. // Сталь. –1970. –№. 5. –С. 424-427.
12. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. –М.: Металлургия, 1971. –368 с.
13. Фомичев И.А., Сай Н.Ф., Румянцев Б.Ф. Прокатка труб из алюминиевых сплавов на трубопрокатных установках // Цветные металлы. –1959. –№. 6. –С. 75-79.
14. Чаликов В.В. Исследования процесса винтовой прокатки тел вращения из высокопрочных алюминиевых сплавов на трехвалковых станах: Дисс. канд. техн. наук. –М.: МВТУ им. Баумана, 1970. –230 с.
15. Освоение поперечно-винтовой прокатки труб из титана / В.Я. Шапиро, И.Л. Годин, Ю.Ф. Лузин и др. // Цветные металлы. –1978. –№. 6. –С. 61-64.
16. Прошивной стан для труб из алюминиевых сплавов / В.Я. Шапиро, И.К. Тартаковский, А.К. Афанасьева и др. // Цветная металлургия. –1979. –№. 4. –С. 40-42.
17. Прошивка в двухвалковом стане слитков сплава Д16 / В.Я. Шапиро, А.К. Афанасьева, Н.А. Беляков и др. // Цветные металлы. –1978. –№. 2. –С. 61-64.
18. А.с. № 341544 СССР, МКИ В21в 19/00. Клеть косовалкового стана / А.Ф. Белов, Е.И. Панов, И.К. Тартаковский и др. // Б. И. –1972. –№. 25.

19. А.с. № 348250 СССР, МКИ В21в 19/60. Рабочая клеть трубопрокатного стана / Г.Д. Стыркин, И.Н. Потапов, Е.И. Панов и др. // Б. И. –1972. –№. 25.
20. А.с. № 519240 СССР, МКИ В21в 39/00. Устройство подачи заготовки в рабочую клеть прокатного стана / П.И. Ермолаев, А.П. Подкуйко, П.М. Финагин и др. // Б. И. –1976. –№. 24.
21. А.с. № 605651 СССР, МКИ В21в 19/00. Рабочая клеть стана поперечно-винтовой прокатки / П.И. Ермолаев, Б.И. Самохин, И.К. Тартаковский и др. // Б. И. –1978. –№. 17.
22. Новый технологический инструмент для поперечно-винтовой прокатки прутков / О.Ю. Ильин, И.К. Тартаковский, Б.И. Самохин и др. // Технология легких сплавов. –1983. –№. 8. –С. 39-42.
23. Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, Н.В. Барбарич, М.В. Васильчиков и др. –М.: Metallurgy, 1971. –336 с.; ил.
24. Грановский С.П., Мехов Н.В., Майзелис Г.С. Прокатка профилированных труб // Сталь. –1965. –№. 1. –С. 53.
25. Грановский С.П., Мехов Н.В., Майзелис Г.С. Новый стан для прокатки профилированных трубных заготовок для втулочных изделий // Вестник машиностроения. –1969. –№. 2. –С. 53-54.
26. Ильин О.Ю., Панов Е.И., Шапиро В.Я. Разработка конструкции оборудования и освоение поперечно-винтовой прокатки легких сплавов // Технология легких сплавов. –2000. –№. 5. –С. 39-46.
27. Афанасьева А.К., Телешов В.В., Козлова О.М. Структура и свойства труб из алюминиевых сплавов, изготовленных прошивкой на косовалковых станах // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. –1978. –№. 1. –С. 56-59.

28. Качество прутков из титановых сплавов, полученных различными методами / В.Я. Шапиро, Ю.П. Гриценко, С.А. Кушакевич и др. // Цветные металлы. –1979. –№. 1. –С. 61-63.
29. Прошивка гильз из слитков алюминиевых сплавов с улучшенным качеством поверхности на двухвалковом стане / Е.И. Баранчиков, В.Я. Шапиро, В.А. Ишунькин и др. // Цветная металлургия. –1979. –№. 6. –С. 46-48.
30. Коробщиков В.Г., Гриценко Ю.П., Шапиро В.Я. Сравнение качества прутков ВТЗ-1, полученных продольной и винтовой прокаткой // Цветные металлы. –1985. –№. 8. –С. 101-103.
31. Влияние радиально-сдвиговой прокатки на качество полуфабрикатов из титановых сплавов / Е.А. Харитонов, И.Н. Потапов, И.З. Вольшонок и др. // Цветные металлы. –1992. –№. 5. –С. 56-57.
32. Панов Е.И., Ильин О.Ю. О качестве прутков и труб из легких сплавов, полученных поперечно-винтовой прокаткой // Технологии легких сплавов. –2001. –№. 2. –С. 27-31.; ил.
33. Панов Е.И., Ильин О.Ю. Расширение технологических возможностей универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 // Технологии легких сплавов. –2002. –№. 2. –С. 41-52.; ил.
34. Жаворонков В.А., Марков Ю.А. Исследование нормальных контактных напряжений при поперечной и винтовой прокатке сплошных и полых заготовок // Труды МВТУ. –1974. –№. 176. –Машины-автоматы и прокатное производство. –С. 73-85.

35. Жаворонков В.А., Чаликов В.В. К вопросу определения давления металла на валки и расходе энергии при винтовой прокатке в трехвалковых станах // Труды МВТУ. –1974. –№. 176. –Машины-автоматы и прокатное производство. –С. 93-101.
36. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. –М.: Машиностроение, 1979. –215 с.
37. Объемные задачи теории прокатки / А.И. Целиков, В.К. Белянинов, И.Н. Ананьев и др. // Труды МВТУ. –1984. –№. 412. –Машины и агрегаты металлургического производства. –С. 8-24.
38. Расчет энерго - силовых параметров и формоизменение при прокатке в черновых клетях широкополосных станов методом конечных элементов / В.В. Калмыков, И.Н. Ананьев, В.К. Белянинов и др. // Труды МВТУ. –1984. –№. 412. –Машины и агрегаты металлургического производства. –С. 57-67.
39. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести. –М.: Высшая школа, 1979. –118 с.
40. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. –М.: Мир, 1975. –542 с.
41. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. –М.: Мир, 1979. –480 с.
42. Теория прокатки. Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. –М.: Металлургия, 1982. –335 с.
43. Трехмерное конечно-элементное моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки / Е.И. Панов, А.А. Восканьянц, А.В. Иванов и др. // Технология легких сплавов. –2001. –№. 5-6. –С. 54-59.

44. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. –М.: Metallurgizdat, 1963. –672 с.
45. Ерманок М.З. Прессование изделий специальной формы. –М.: Metallurgiya, 1994. –304 с.
46. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. –М.: Metallurgiya, 1990. –344 с.
47. Шапиро В.Я., Алексеев В.Н., Цирюльников Е.В. Исследование деформируемости прутков из алюминиевых сплавов при поперечно-винтовой прокатке // Цветные металлы. –1990. –№. 7. –С. 89-91.
48. Пименов Ю.П., Тарарышкин В.И., Эскин Г.И. Оптимизация технологии плавки и модифицирования заэвтектических силуминов // Технологии легких сплавов. –1997. –№. 3. –С. 17-23.
49. Тарарышкин В.И., Пименов Ю.П., Эскин Г.И. Выбор модификаторов для измельчения структуры заэвтектических силуминов // Технологии легких сплавов. –1997. –№. 3. –С. 2-38.
50. Эскин Г.И., Пименов Ю.П. Коррозионно-стойкие свариваемые заэвтектические силумины для нефтегазового комплекса // Технологии легких сплавов. –1997. –№. 6. –С. 27-32.