

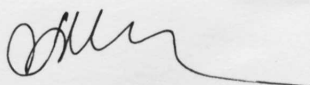
1583089

На правах рукописи
УДК 621.961.2

ПАНОВ Евгений Иванович

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

Специальность 05.03.05 – Технологии и машины
обработки давлением



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2002

Работа выполнена на ОАО «ВИЛС»

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор СЕНИЦКИЙ В.М.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ОСАДЧИЙ В.Я.

кандидат технических наук – ЗАКОРКО Н.П.

Ведущее предприятие – ОАО «Электростальтяжмаш»

Защита состоится «3» июля 2002 г. в ^{14³⁰} часов на заседании

диссертационного совета Д 212.141.04 при Московском Государствен-
ном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005,
Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим
выслать по указанному адресу.

99-63.

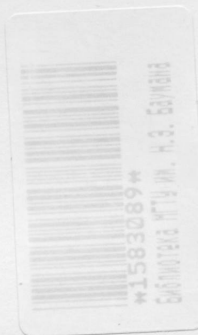
комиться в библиотеке МГТУ

2002 г.

1583089

В.И. Семёнов

В.И.Семёнов.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Использование двухвалковой схемы поперечно-винтовой прокатки в России и за рубежом для прошивки заготовок в полую 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.

Многочисленные исследования процессов поперечно-винтовой прокатки, напряженно-деформированного состояния и достоинств трехвалковой схемы поперечно-винтовой прокатки, выполненные Тетериным П.К., Полухиным П.И., Потаповым И.Н., Чекмаревым А.П. и другими в 1950÷1960 гг. явились толчком для создания различных конструкций станов поперечно-винтовой прокатки с трехвалковой схемой прокатки. Ряд таких станов, особенно для изготовления заготовок, близких по конфигурации к готовым деталям и получивших название деталепрокатных станов были созданы ВНИИМЕТМАШем под руководством академика А.И. Целикова.

Одновременно были разработаны технологические процессы поперечно-винтовой прокатки, обеспечивающие производство изделий машиностроительного назначения (валы переменного сечения, шары мелющие и для подшипников, штифты, велосипедные втулки, изделия с винтовыми поверхностями, ребристые трубы), что также резко расширило и технологические возможности поперечно-винтовой двухвалковой схемы прокатки, которая до этого применялась в качестве основной классической операции для прошивки гильз.

Прослеживается тенденция конструктивного улучшения рабочей клетки станов, особенно трехвалковых, с целью достижения максимального удобства в их эксплуатации, упрощения конструкции, сокращения времени на перевахлах рабочих валков, облегчения веса конструкции.

Все известные станы поперечно-винтовой прокатки, как в нашей стране, так и за рубежом, конструктивно выполнялись и функционировали с рабочей клетью, которая могла работать только по одной из известных схем прокатки: или двух-, или трехвалковой.

Достижение же лучших технологических показателей, например, при прокатке труб, реализовывались чаще всего посредством последовательно расположенных друг за другом трехвалковых и двухвалковых рабочих клетей, например, в трубопрокатных установках для изготовления тонкостенных труб. Производственные потребности все чаще заявляли о необходимости разработки универсальной конструкции стана поперечно-винтовой прокатки, который мог бы трансформироваться и обеспечивать как двух-, так и трехвалковую схему работы.

Цель и задачи работы. Создание конструкции универсального стана поперечно-винтовой прокатки с широкими технологическими возможностями, который бы, имея в своем составе только одну рабочую клеть (универсальную) мог бы поочередно работать по различным схемам прокатки – прошивки – раскатки, объединил бы достоинства каждой из этих схем прокатки, расширил бы сортамент выпускаемой продукции и обеспечил бы гибкую технологию производства посредством перенастройки рабочей клетки с двухвалковой на трехвалковую и обратно.

При этом решались следующие задачи:

- создание нескольких вариантов конструкций универсальной рабочей клетки, позволяющей поочередно осуществлять работу стана на различных схемах прокатки (двух-, трехвалковую и более), объединяя тем самым на одной рабочей клетке достоинства каждой из указанных схем;
- создание линии универсального стана поперечно-винтовой прокатки с использованием универсальной рабочей клетки (технический проект);

- изготовления в металле универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 с реализацией в нем признаков и степеней универсальности, описанных выше;

- проведение анализа силовых, энерго-силовых параметров, технологических и технических возможностей специализированных станов поперечно-винтовой прокатки и сравнения их с паспортными данными универсального стана ПВП 20-60 с целью изучения возможности производства на нем широкой номенклатуры заготовок для деталей машиностроительного назначения;

- проведение компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния при поперечно-винтовой прокатке сплошных осесимметричных профилей и его сравнительного анализа при двух- и трехвалковой схемах прокатки с воздействиями подпора, натяжения и совместного действия подпора и натяжения;

- определение технологических параметров поперечно-винтовой прокатки на стане ПВП 20-60 для производства высококачественных деформированных полуфабрикатов из трудно-деформируемых звтектических силуминовых сплавов 01390 и 01391.

Научную новизну работы составляют:

- создание впервые в мировой практике конструкции универсальной рабочей клетки (в трех вариантах) для станов поперечно-винтовой прокатки, позволяющей поочередно осуществлять операции «прокатки-прошивки-раскатки» по различным схемам прокатки (двух-, трех-, четырехвалковой) с целью реализации преимуществ каждой схемы прокатки на одном трансформируемом стане (конструкции рабочей клетки защищены тремя авторскими свидетельствами на изобретения).

- установление общих закономерностей и различий, сравнительных достоинств и недостатков различных схем прокатки в одинаковых технических и технологических условиях на одной и той же рабочей клетки;

- создание конечно-элементной модели процесса двух- и трехвалковой прокатки на основе трехмерного конечно-элементного моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки, что позволило решить следующие задачи:

- выполнить сравнительные расчеты параметров напряженно-деформированного состояния прокатываемой заготовки на двух- и трехвалковых схемах прокатки, а также расчеты энергии формообразования, работы внешних сил и мощности прокатки, расчет секундных объемов прокатываемого металла, т.е. сравнивать производительность технологических процессов.

- наглядно определить в необходимых сечениях прокатываемой заготовки и на ее поверхности распределение и абсолютные величины радиальных, осевых, касательных и эквивалентных напряжений при установившемся режиме прокатки и в стадии захвата заготовки;

- сократить количество многочисленных и дорогостоящих экспериментальных прокаток (прошивок, раскаток), ограничиваясь контрольными единичными экспериментами, целью которых должна быть только проверка правильности результатов, полученных методом трехмерного конечно-элементного моделирования;

Практическая значимость:

- возможность выполнения полного законченного технологического цикла «прокатка-прошивка-раскатка-редуцирование-калибровка» на одном стане ПВП 20-60 с использованием универсальной конструкции рабочей клетки;

- возможность резкого расширения сортамента выпускаемой продукции (сплошные и полые, гладкие и изделия периодического профиля, изделия специального машиностроительного назначения) за счет полного использования технологических возможностей различных схем прокатки одной и той же рабочей клетки;

- малая производственная площадь, занимаемая универсальным станом ПВП 20-60 и использование его в режиме гибкой технологии для производства малотоннажных партий изделий широкого ассортимента;
- простота конструкции универсальной рабочей клетки, возможность переналадки ее с одной схемы на другую за короткий промежуток времени;
- возможность создания в процессе прокатки любого наперед заданного напряженно-деформированного состояния прокатываемого изделия способом варьирования схем прокатки (двух- или трехвалковой) и приложения к изделию различных по величине и назначению внешних дополнительных усилий (подпора и натяжения) и выбора из различных возможных вариантов наиболее экономичного, менее энергоемкого и наиболее производительного;
- разработан технологический процесс с использованием поперечно-винтовой прокатки на стане ПВП 20-60 производства высококачественных деформированных полуфабрикатов из трудно-деформируемых заэвтекктических силуминовых сплавов 01390 и 01391 для изготовления из них поршней в двигателестроении методом изотермической штамповки.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и обсуждены: на совете лаборатории №2 ВИАЛСа – июнь 1971 г., на отраслевой конференции ученых и специалистов Минавиапрома СССР – октябрь 1971 г., научном семинаре кафедры «оборудование и технология прокатки» МГТУ им. Н.Э. Жуковского – ноябрь 2001 г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 статьях в научно-технических журналах и в 3-х авторских свидетельствах на изобретения.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из литературного обзора, 5 глав, общих выводов, изложена на 209 страницах машинописного текста, включает 84 рисунка, 8 таблиц, библиографический список 52 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Тенденции развития конструктивных особенностей станов поперечно-винтовой прокатки и обоснование необходимости создания универсального стана поперечно-винтовой прокатки.

Данная глава является обзорной, в ней рассмотрены различные этапы развития процесса поперечно-винтовой прокатки, тенденции и направления конструкторских и технологических особенностей отечественных и зарубежных исследований, показаны достоинства и преимущества различных схем прокатки-прошивки на станах поперечно-винтовой прокатки.

Выполнено полное патентное исследование и изучение банка данных изобретений практически всех (21) промышленно развитых стран в части металлургического прокатного оборудования, прокатных станов, поперечно-винтовой прокатки, прошивки гильз, прокатки труб методом поперечно-винтовой прокатки.

При преобладании двухвалковой схемы прокатки (прошивки) для прошивки гильз и производства труб методом поперечно-винтовой прокатки в качестве основной (в 1950 гг.), выявлены тенденции более глубокого изучения поперечно-винтовой прокатки с трехвалковой схемой, стремление конструктивно улучшать рабочие клетки, в основном, трехвалковые.

Исследованием выявлено, что все действующие станы поперечно-винтовой прокатки в нашей стране и за рубежом конструктивно выполнены таким образом, что они могут работать только по одной из известных схем: двух- или трехвалковой.

Разработка в 1950÷1960 гг по инициативе и под руководством академика А.И. Целикова в ЦКБ ММ и затем в ВНИИМЕТМАШе новых технологических процессов для производства заготовки изделий специального машиностроительного назначения (шары, втулки, изделия с винтовыми поверхностями, ребристые трубы и др.) резко расширило технологические возможности обеих схем поперечно-винтовой прокатки (двух- и трехвалковых), особенно возможности двухвалковой схемы, которая длительное время применялась только для прошивки гильз.

Дано обоснование для создания стана поперечно-винтовой прокатки высокой степени универсальности, конструкция которого бы позволила объединить достоинства и преимущества двух- и трехвалковой схем прокатки, реализовать все известные методы и способы поперечно-винтовой прокатки на одной и той же универсальной рабочей клетке (рис. 1).

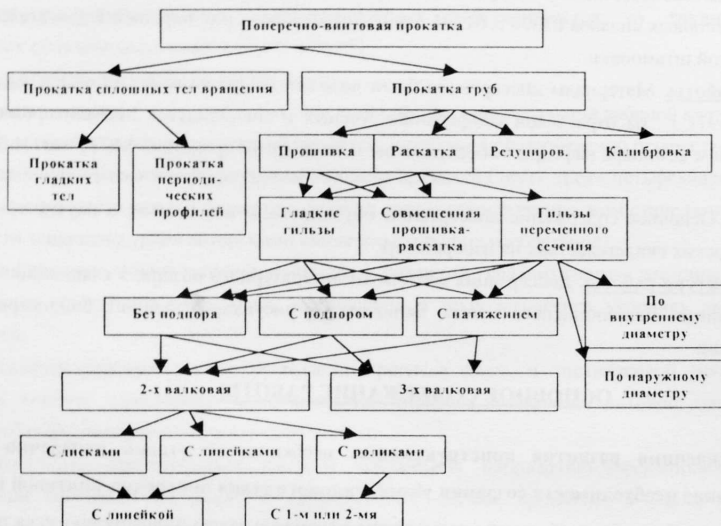


Рис.1 Схема методов и способов поперечно-винтовой прокатки, применяемых на различных 2-х валковых и 3-х валковых станах

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

Использование достоинств и преимуществ двух- и трехвалковых схем поперечно-винтовой прокатки, а также реализация всех известных методов и способов прокатки на одном и том же стане стали возможны в результате разработки и создании оригинальной конструкции рабочей клетки, ставшей основой спроектированного и впоследствии изготовленного универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60. Рабочая клетка выполнена в нескольких вариантах.

На Рис. 2 показаны конструкции клетки, обеспечивающие двух-, трех- и четырехвалковую прокатку (Варианты I, II, III).

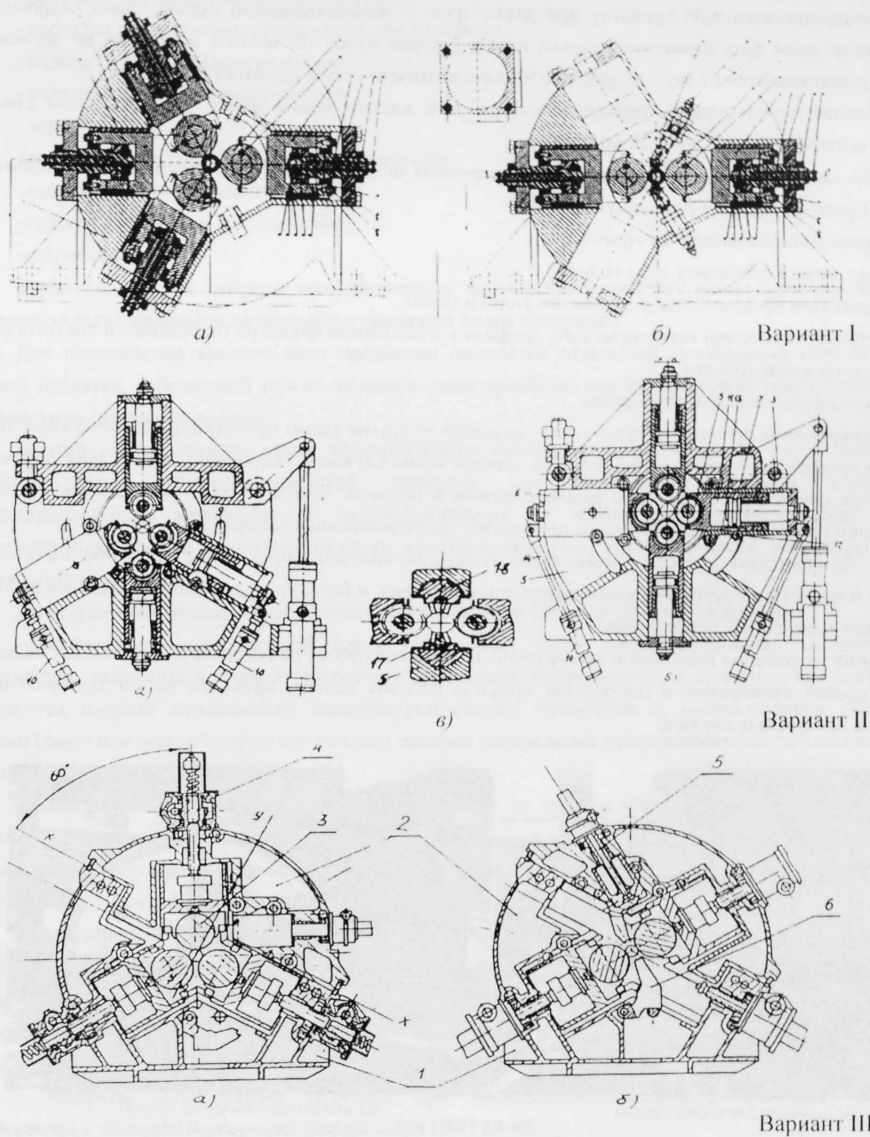


Рис 2. Универсальная рабочая клетка станка ПВП 20-60.

Вариант I: а) трехвалковая схема; б) двухвалковая схема.

Вариант II: а) трехвалковая схема; б) четырехвалковая схема; в) двухвалковая схема.

Вариант III: а) трехвалковая схема; б) двухвалковая схема.

В работе показан вариант (II) конструкции универсальной рабочей клетки, который позволяет выполнить поперечно-винтовую прокатку при двух-, трех- и четырехвалковой схемах. Дано подробное описание конструкций всех вариантов рабочей клетки, которая путем несложных и кратких по времени операций переналаживается из двух- в трех- или четырехвалковую схемы прокатки и наоборот.

На основе использования универсальной рабочей клетки создана линия универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 (Рис.3).

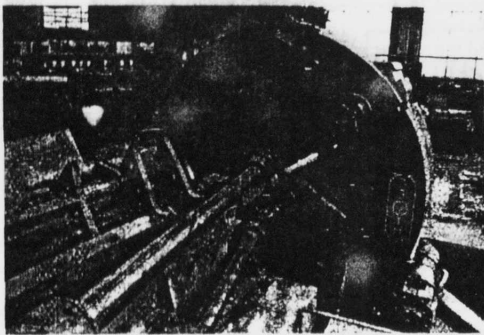
Разработаны конструкции основных технологических механизмов и узлов линии стана ПВП 20-60, позволяющих работать стану в различных режимах:

- в режиме прокатки сплошных тел вращения;
- в режиме прошивки сплошных тел в гильзы;
- в режиме раскатки предварительно прошитых гильз в трубы;
- в режиме прокатки изделий периодического профиля с изменением диаметра (наружного и внутреннего для полых тел) по длине изделия;
- в режиме редуцирования или калибровки.

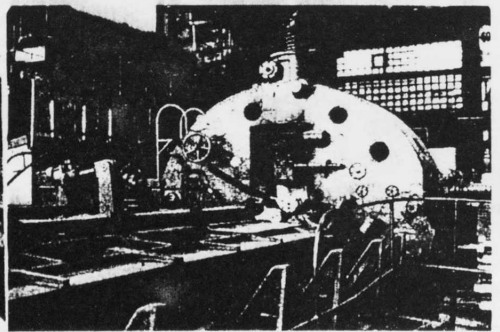
Для сокращения времени на переналдку от одной на другие схемы прокатки предложена кассетная конструкция крепления рабочего вала, которая одновременно служит и гидроцилиндром. Таким образом обеспечивается сведение и разведение рабочих валков в процессе прокатки для производства изделий периодического профиля согласно заданной программе, закодированной в копировальной линейке.

При эксплуатации универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 выявлены достоинства и недостатки работы каждого агрегата и узла стана, и была проведена дополнительная работа по устранению выявленных недостатков.

Пути их устранения показаны в диссертации. Выполнена работа по реконструкции рабочих валков, предложен способ калибровки и построения профиля рабочих валков, проведен расчет применяемых типоразмеров прошивных оправок.



а) входная сторона стана



б) выходная сторона стана

Рис.3 Общий вид стана ПВП 20-60.

Глава 3. Перспективы использования универсального стана ПВП 20-60.

Анализ созданных в ВНИИМЕТМАШе в 1960-1970 гг станов поперечно-винтовой прокатки выявил следующие применяемые технологические схемы:

Двухвалковая схема используется при прокатке:

- мелких шаров и шариков для подшипников;

- коротких тел вращения (штифты, втулки);
- коротких тел вращения с периодическим профилем;
- изделий с винтовой поверхностью;
- изделий с резьбовой поверхностью;
- червячных пар.

Трехвалковая схема применяется при прокатке:

- изделий с винтовой поверхностью;
- изделий с резьбовой поверхностью;
- ребристых труб.

В данной главе рассмотрены технологические, технические и конструктивные особенности каждого из технологических процессов производства указанных видов продукции.

Для изготовления каждого вида продукции создавался отдельный специальный стан поперечно-винтовой прокатки, работающий только по одной схеме прокатки: или двухвалковой, или трехвалковой, в зависимости от своего назначения.

В этой главе показаны также конструктивные особенности производимых ранее специальных прокатных станов поперечно-винтовой прокатки для изготовления изделий специального машиностроительного назначения и проанализированы их паспортные технологические данные, энергосиловые параметры: мощность прокатки, крутящие моменты, усилия прокатки, параметры рабочих инструментов и заготовок.

По результатам исследования и сопоставимого анализа сделаны следующие выводы:

- конструкция универсальной клетки стана ПВП 20-60 способна (помимо технологических возможностей, указанных в главе 2) обеспечить реализацию технологических процессов по изготовлению большинства изделий специального машиностроительного назначения с использованием обеих схем прокатки (двух- или трехвалковую) при условии наличия специальных профилированных рабочих валков для каждого техпроцесса;
- размеры инструментов (диаметр рабочих валков, их ширина (бочка валков)), обороты вращения рабочих валков, углы подачи и раскатки, используемых при изготовлении изделий специального машиностроительного назначения не превышают паспортных технологических возможностей, заложенных в универсальную рабочую клетку стана ПВП 20-60;
- энергосиловые параметры (мощности прокатки, крутящие моменты, усилия на рабочие валки) при прокатке изделий специального машиностроительного назначения значительно ниже паспортных данных универсальной клетки стана ПВП 20-60, что говорит о конструкторской, технической и технологической возможностях рабочей клетки стана ПВП 20-60 выполнять указанные виды прокаток с поочередным использованием различных схем обработки (двух- и трехвалковой);
- габариты используемых заготовок при производстве изделий специального назначения укладываются в интервал паспортных данных стана ПВП 20-60;
- для производства некоторых видов изделий (изделия с винтовой поверхностью и ребристые трубы с винтовыми ребрами) на стане ПВП 20-60 необходимо осуществить дополнительные технические мероприятия по более строгой синхронизации вращения рабочих валков.

Сравнение технико-технологических характеристик различных специальных станов поперечно-винтовой прокатки для производства изделий специального машиностроительного назначения с аналогичными характеристиками стана ПВП 20-60 наглядно демонстрирует вышеперечисленные выводы. (Таблица № 1).

В целом, технологические возможности универсального стана ПВП 20-60 показаны на Рис. 4.

Сравнение технико-технологических характеристик стана ПВП 20-60 и специализированных станков.

Параметры	Универсальный стан ПВП 20-60	Стан для прокатки круглых тел - шаров	Стан для прокатки коротких тел вращения (втулки)	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, $d=40-100$, $l=6300$ гиляза, $d=25-58$, $l=1600-2000$	$d = 26 - 125$ $l = 2500 - 4000 - 6000$	$d = 3 - 6$ $l = 6 - 25$	$d = 40 - 60$ $l = 300$	$d = 30 - 150$ $l = 2000$	$d = 20 - 60$ $l = 6000$
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, °C	$0 - 300 - 2000$	950	1300	1000	1500	950
Усилия на рабочий валок, т	$24,5 - 58,8$	$6 - 12,5$	$0,7 - 19$	$11,8 - 25,9$	$8 - 14 - 30$	$3 - 12$
Момент крутящий Мкр, кН · м	$9,8 - 24,5$	$7 - 15$	$3 - 8$	$1,12 - 3,9$	$12 - 20$	$5 - 17$

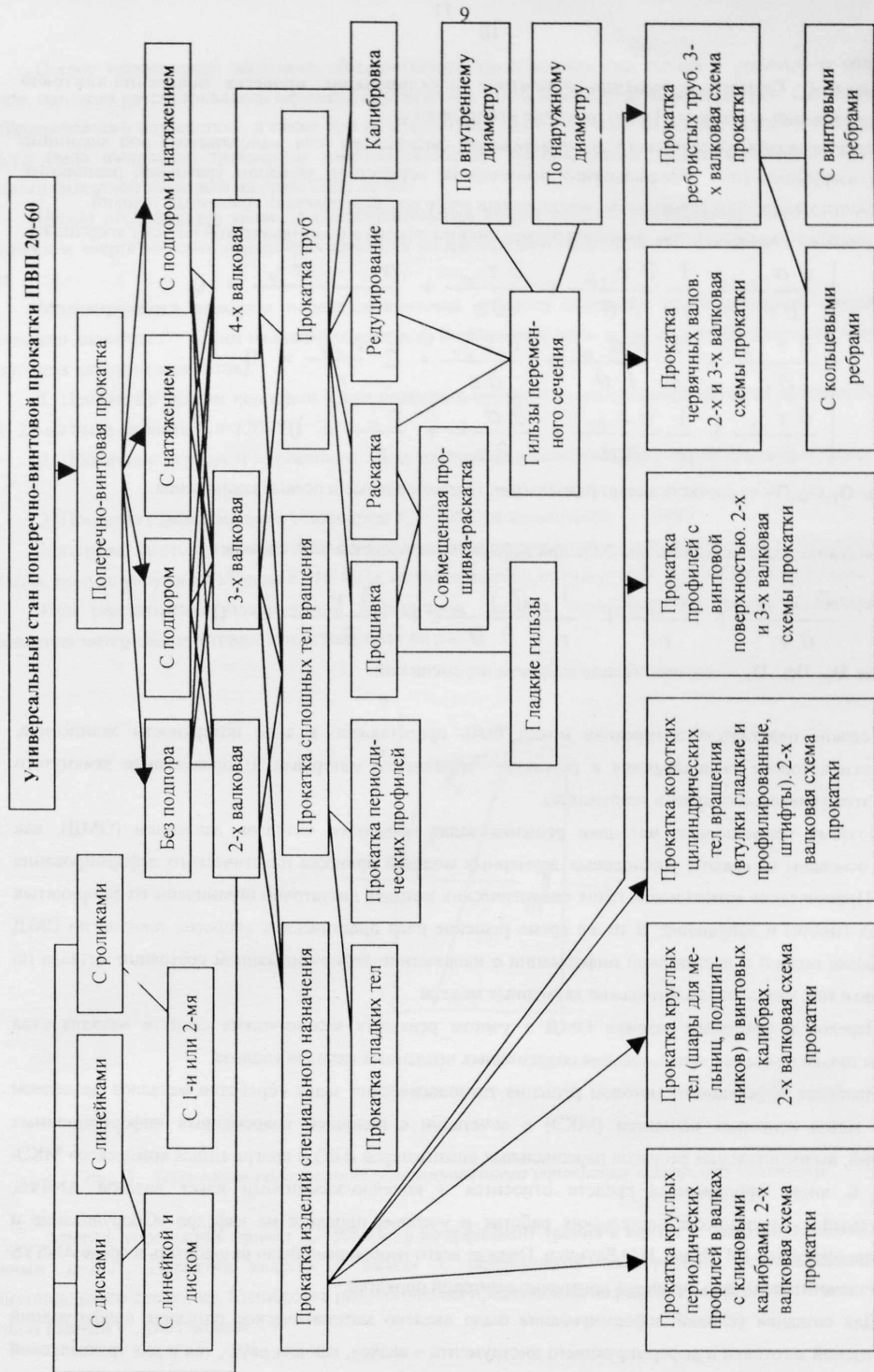


Рис. 4. Технологические возможности универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60.

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

Решение задачи пластического деформирования физического тела, находящегося под внешними силовыми нагрузками (или деформациями) основано на совместном решении уравнений равновесия, несжимаемости материала и условий пластичности при учете соответствующих граничных условий.

Уравнения равновесия при движении элементарного объема в цилиндрической системе координат:

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

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ — соответственно радиальные, тангенциальные и осевые напряжения.

Несжимаемость материала при больших деформациях представляется в виде

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

где v_r, v_θ, v_z — соответственно скорости перемещений.

Условие пластического перехода может быть представлено в виде поверхности эллипсоида, главные оси которого увеличиваются в результате упрочнения материала. В общем виде замкнутого решения этих уравнений получить невозможно.

Поэтому 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 различных 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 ОМД с учетом реальных механических свойств металла стал возможен только на основе использования современных численных методов анализа.

Наиболее эффективным методом решения технологических задач обработки металлов давлением является метод конечных элементов (МКЭ) в сочетании с наличием современных информационных технологий, вычислительных ресурсов персональных компьютеров (ПК) и программных комплексов МКЭ-анализа. К числу программных средств относится и конечно-элементный пакет анализа ANSYS, используемый в научно-исследовательских работах и учебном процессе на кафедре «Оборудование и технология прокатки» МГТУ им. Н.Э.Баумана. Прежде всего необходимо было разработать в среде ANSYS конечно-элементную модель процесса поперечно-винтовой прокатки.

Для создания условий деформирования было введено математическое описание конфигураций прокатываемой заготовки и деформирующего инструмента — валков, как для двух-, так и для трехвалковой схемы, а также взаимное их расположение, обеспечивающее радиальную деформацию.

Осевое перемещение заготовки обеспечивалось приложением сил трения в контакте и сил с ее торцов, при этом рассматривались варианты перемещения заготовки посредством «подпора», «натяжения» и комбинированного воздействия, а также при их отсутствии. Таким образом, на основе использования пакета ANSYS было выполнено трехмерное конечно-элементное моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки на стане ПВП 20-60.

Целью исследования является сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния заготовки и энергетических параметров процесса поперечно-винтовой прокатки для двух- и трехвалковой схем.

Моделировалась холодная поперечно-винтовая прокатка сплошной цилиндрической заготовки с начального диаметра $D=120\text{ мм}$ на конечный диаметр $d=90\text{ мм}$ при двух- и трехвалковой схемах прокатки для следующих случаев (вариантов):

1. Прокатка с задним подпором. Сила подпора в соответствии с технической характеристикой стана ПВП 20-60 была принята $T_b = 120\text{ кН}$.
2. Прокатка с передним натяжением. Сила натяжения в соответствии с характеристикой стана – $T_f = 80\text{ кН}$.
3. Прокатка одновременно и с подпором $T_b = 120\text{ кН}$ и натяжением $T_f = 80\text{ кН}$.

Материал заготовки – медь М0. Механические характеристики материала: предел текучести $\sigma_T = 120\text{ МПа}$, модуль упругости 1^{го} рода $E=10^5\text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu=0,31$, плотность $\rho=8100\text{ кг/м}^3$.

При рассмотрении пластической деформации принята билинейная изотропная характеристика упрочнения материала заготовки, представленная на рис. 5.

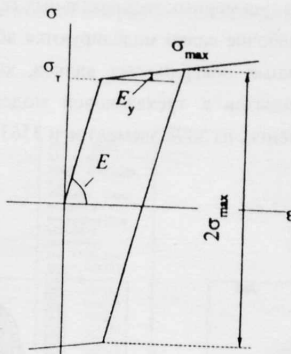


Рис. 5. Характеристика билинейного изотропного упрочнения материала заготовки.

Модуль упрочнения принят $E_v=50\text{ МПа}$, а коэффициент трения в контакте «заготовка-валок» принят равным $\mu=0,27$. Прокатка ведется в валках с безгребневой калибровкой, устанавливаемых без тангенциального смещения. Калибровка рабочего вала представлена на рис. 6. Угол раскатки в расчетах был принят равным θ' , угол подачи – ϑ' .

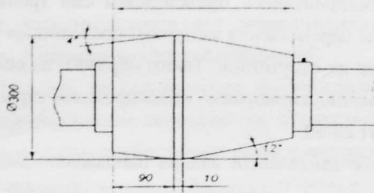


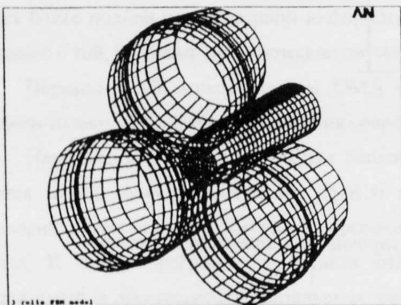
Рис. 6. Калибровка рабочего вала стана ПВП 20-60.

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

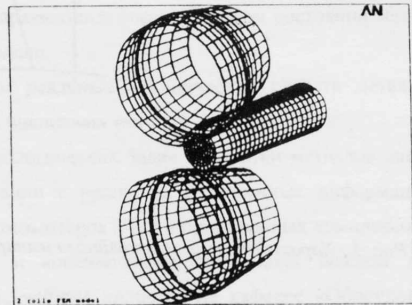
- разогрев деформируемого материала и рабочих валков не рассматривается (изотермические условия деформации);
- прокатка считается холодной (температура металла ниже температуры рекристаллизации) и принимается, что сопротивление деформации не зависит от скорости деформации;
- принимается, что трение по всей поверхности контакта с рабочими валками подчиняется закону сухого трения Кулона, причем коэффициент трения постоянен по всей контактной поверхности;
- рабочие валки прокатного стана рассматриваются как абсолютно жесткие тела;
- для обеспечения гарантированного захвата заготовки рабочими валками передняя ее (заготовки) часть выполнена конической.

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

Модель заготовки формируется из трехмерных твердотельных гексаэдрических элементов с упруго-пластическими свойствами. Прокатные рабочие валки моделируются абсолютно жесткими оболоченными 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 (рис. 7).



а



б

Рис. 7. 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 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 рабочего вала стана.

Независимой переменной в модели является время, изменяющееся в процессе решения 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 $d\varphi = \omega dt$, где ω - угловая скорость вращения рабочих валков. Принято, что рабочие валки вращаются с постоянной скоростью 60 об/мин. Таким образом, интервал времени в одну секунду в результатах решения соответствует одному обороту рабочих валков.

Усилия подпора T_b и натяжения T_f 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.

Обработка результатов моделирования выполнена с помощью постпроцессора ANSYS.

Результаты представлены в виде цветовых полей распределения напряжений и деформаций по поверхности и во внутренних сечениях заготовки для различных моментов времени.

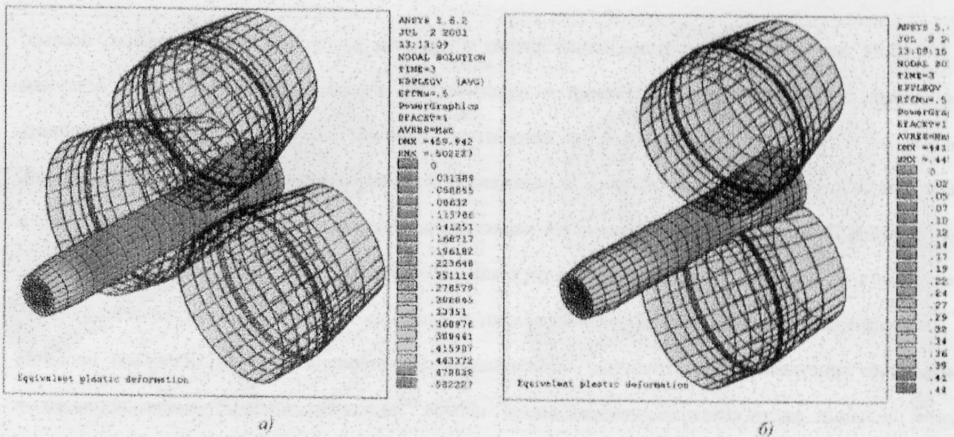


Рис. 8. Деформированный контур заготовки и распределение эквивалентной пластической деформации ϵ_p при прокатке с подпором в 3-х (а) и 2-х (б) валках.

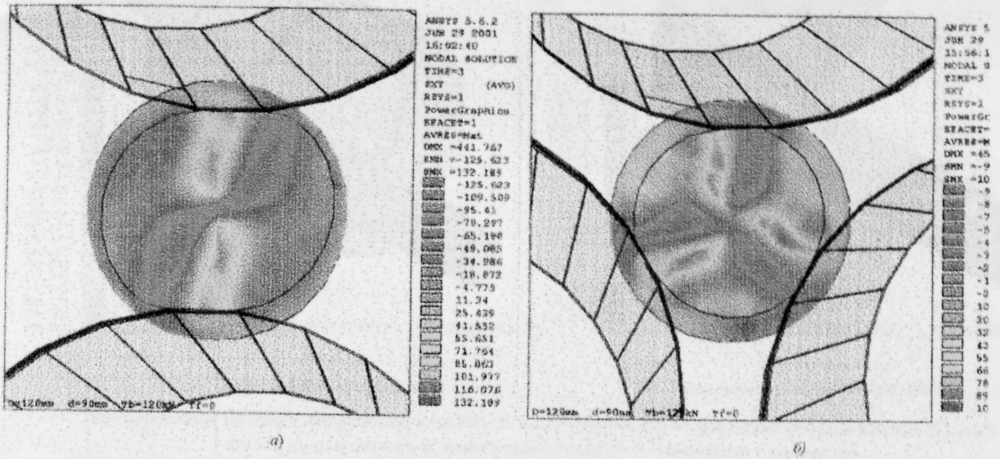


Рис. 10. Распределение касательных напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси Z , $\sigma_{\tau\phi}$ (МПа) в зоне максимального обжима при прокатке с подпором в 2-х (а) и 3-х (б) вальках.

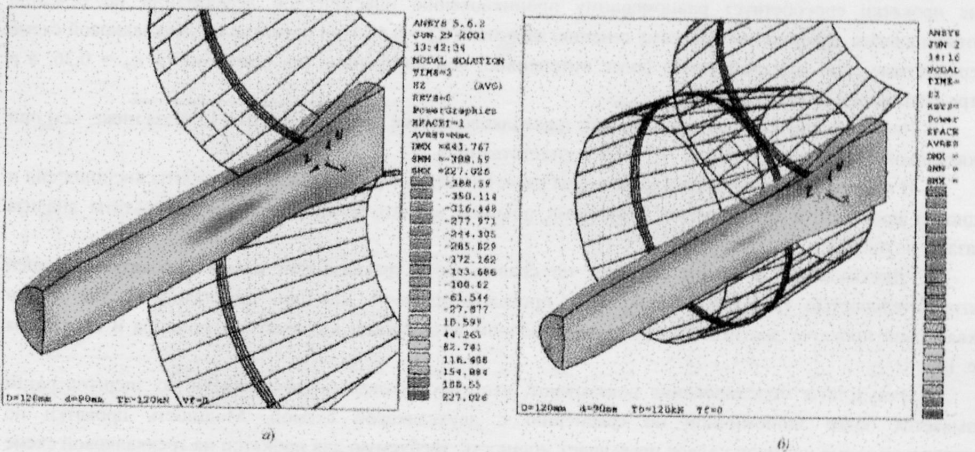


Рис. 11. Распределение осевых напряжений σ_z (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором: а-двухвальная схема; б-трехвальная схема.

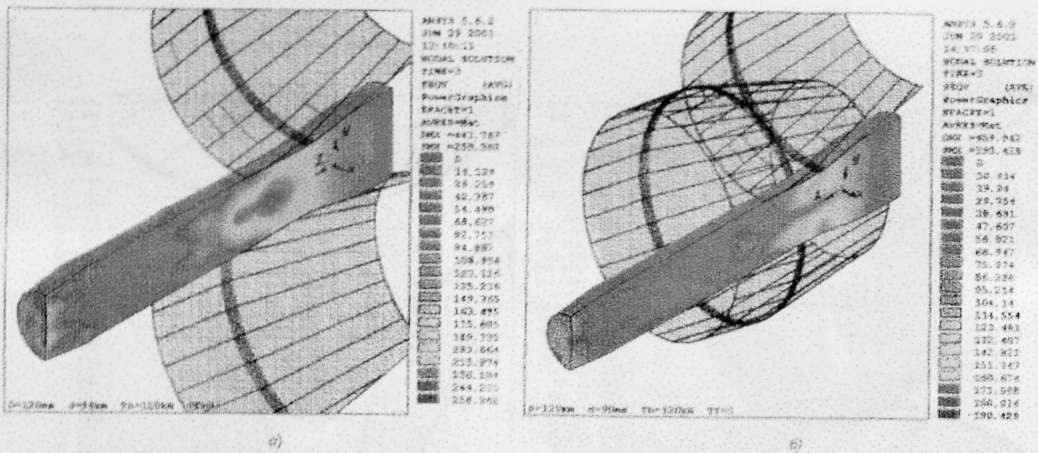


Рис. 12. Распределение эквивалентных напряжений σ_e (МПа) в продольном сечении заготовки при прокатке с подпором. а-двухвалковая схема; б-трехвалковая схема.

На основании результатов, полученных с помощью метода трехмерного конечно-элементного моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки при разных схемах обработки следует сделать следующие выводы:

1. Прокатка по трехвалковой схеме обеспечивает большую суммарную пластическую деформацию заготовки.
2. Результаты моделирования показывают, что стесненное уширение заготовки при трехвалковой схеме прокатки способствует равномерному проникновению пластической деформации по сечению заготовки в очаге деформации (по всему сечению заготовки $\varepsilon_{ep} = 0,4$). При прокатке по двухвалковой схеме поверхностные слои деформируются более интенсивно, чем внутренние (на поверхности $\varepsilon_{ep} = 0,36$, а в центре заготовки $\varepsilon_{ep} = 0,26$) (рис. 9).
3. Величина контактного давления при трехвалковой схеме прокатки почти в 1,5 раза ниже, чем при двухвалковой прокатке (324 МПа и 467 МПа соответственно).
4. В процессе моделирования выполнены расчеты энергии формоизменения, работы внешних сил и мощности прокатки, а также расчет секундных объемов прокатываемого металла. Результаты анализа показаны на рис. 13.
5. Двухвалковая прокатка обладает по сравнению с трехвалковой схемой прокатки большей производительностью (рис. 14). Наибольшая производительность как при двухвалковой, так и при трехвалковой прокатке достигается при одновременном воздействии на заготовку подпора и натяжения (рис. 14).
6. Результаты моделирования показывают, что трехвалковая схема прокатки по энергозатратам оказывается более экономичной по сравнению с двухвалковой схемой. Мощность прокатки по двухвалковой схеме примерно вдвое превышает мощность, требуемую для прокатки на трехвалковой схеме (Рис. 15).
7. Самым экономичным процессом из рассматриваемых вариантов является прокатка при трехвалковой схеме с натяжением (Рис. 16).
8. Одинаковые напряженно-деформированные состояния заготовки при разных схемах прокатки можно получать, применяя и варьируя различные по сути внешние нагрузки (подпор и натяжение).

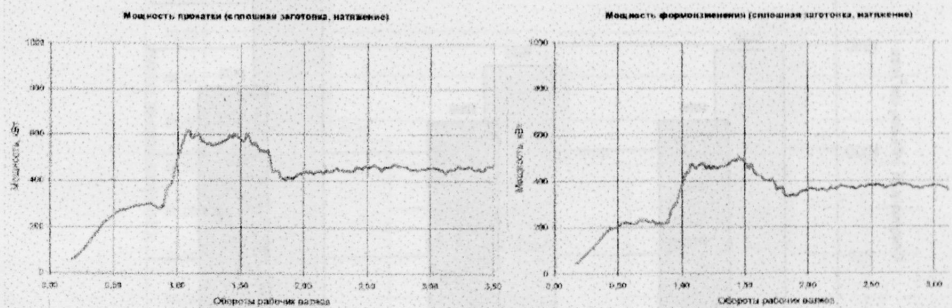
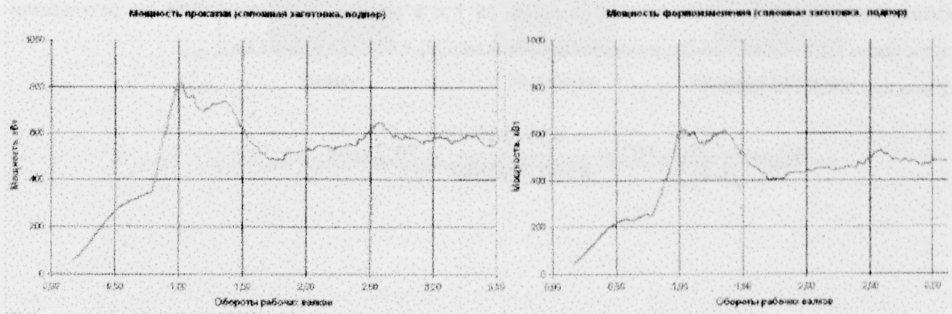
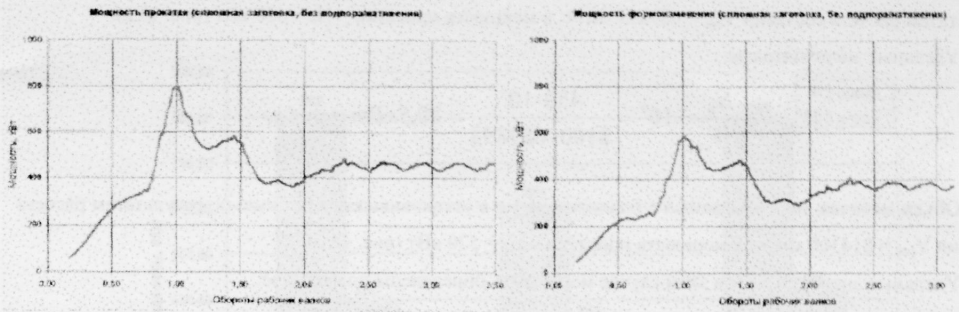


Рис. 13. Графики изменения мощности прокатки (1) и мощности формоизменения (2) на стадиях захвата и установившегося режима прокатки без подпора и натяжения (а), с подпором (б), с натяжением (в).

Объем металла, прокатываемый без подпора и натяжения за 1 с в установившемся режиме, по результатам расчета составил $V_{сек} = 689893 \text{ мм}^3/\text{с}$, а мощность прокатки – $N_n = 450 \text{ кВт}$ (рис. 13 а).

Удельные энергозатраты:

$$W_{yo} = \frac{N_n}{\rho \cdot V_{сек}} \cdot 10^9 = \frac{450 \cdot 10^9}{8100 \cdot 689893} = 80,5 \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{кг}$$

Объем металла, прокатываемый с подпором за 1 с в установившемся режиме, по результатам расчета составил $V_{сек} = 814300 \text{ мм}^3/\text{с}$, а мощность прокатки – $N_n = 570 \text{ кВт}$ (рис. 13 б).

Удельные энергозатраты в этом случае могут быть определены по формуле:

$$W_{yo} = \frac{N_n}{\rho \cdot V_{сек}} \cdot 10^9 = \frac{570 \cdot 10^9}{8100 \cdot 814300} = 86,4 \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{кг}$$

Объем металла, прокатываемый с натяжением за 1 с в установившемся режиме, по результатам расчета составил $V_{сек} = 791681 \text{ мм}^3/\text{с}$, а мощность прокатки – $N_n = 450 \text{ кВт}$ (рис. 13 в).

Удельные энергозатраты:

$$W_{yo} = \frac{N_n}{\rho \cdot V_{сек}} \cdot 10^9 = \frac{450 \cdot 10^9}{8100 \cdot 791681} = 70,2 \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{кг}$$

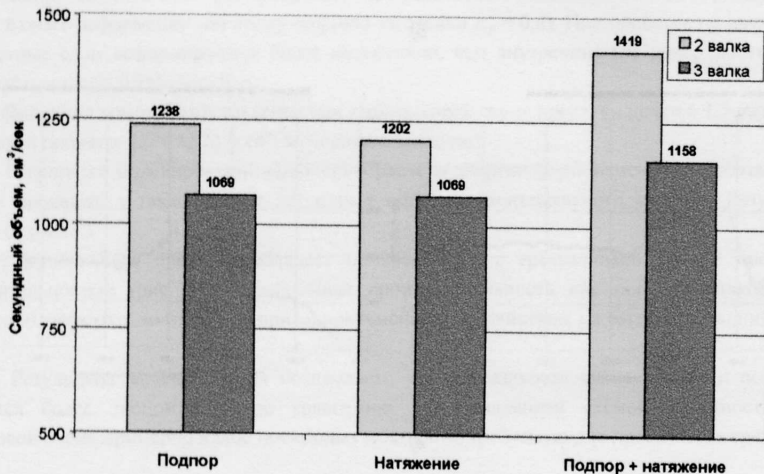


Рис. 14. Производительность стана ПВП 20-60 при прокатке по двух- и трехвалковой схемам с обжатием по диаметру со 120 до 90 мм.

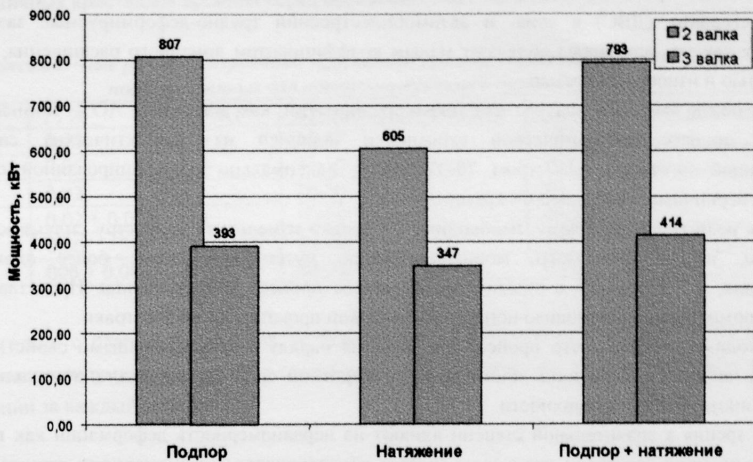


Рис. 15. Мощность прокатки круга с обжатием по диаметру со 120 до 90 мм.

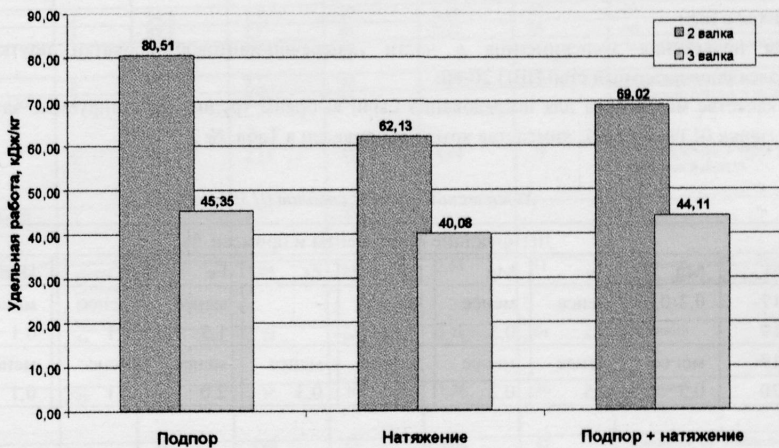


Рис. 16. Удельная работа при прокатке круга с обжатием по диаметру со 120 до 90 мм.

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

В последнее время стали широко применяться в производстве поршневых пар для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в авиа- и автомобилестроении трудно-деформируемые заэвтектические силумины, так как эти материалы обладают малым коэффициентом линейного расширения, повышенной жаропрочностью и износостойкостью.

В частности, большой интерес для таких предприятий, 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, необходимо не только измельчить структуру силуминов в процессе литья слитка, но и продолжить модифицирование путем применения более сложной схемы деформирования, по сравнению с обычно применяемым процессом прессования. Представляет интерес изучения деформирования с помощью поперечно-винтовой прокатки литой заготовки.

Необходимо отметить, что процесс прессования наряду с положительными свойствами имеет и недостатки, в частности: сложность инструмента и короткий срок его работы, значительное трение на контактной с инструментом поверхности.

Силы трения в значительной степени влияют на неравномерность деформации как в поперечном сечении, так и по длине заготовки, что в свою очередь обуславливает неравномерность структуры и свойств прессованного изделия.

Процесс поперечно-винтовой прокатки выгодно отличается от прессования возможностью деформирования ограниченного объема заготовки, высокой производительностью, малой величиной отходов, т.е. высоким коэффициентом использования металла (КИМ), простотой технологического инструмента в изготовлении и наладке, универсальностью и относительно низкой себестоимостью.

Главной целью данного исследования является получение высококачественных прутков из заэвтектических силуминов для последующей штамповки поршней ДВС путем применения поперечно-винтовой прокатки для измельчения структуры силуминов и особенно кристаллов первичного кремния, содержащихся в них.

Для проведения экспериментов в части поперечно-винтовой прокатки прутков силумина использовался универсальный стан ПВП 20-60.

В качестве материалов для исследования были выбраны трудно-деформируемые заэвтектические силумины марки 01390 и 01391, химсостав которых приведен в Табл. № 2.

Табл. № 2

Химический состав сплавов 01390 и 01391.

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

С целью сужения коридора поиска необходимых технологических параметров поперечно-винтовой прокатки на стане ПВП 20-60, т.е. выбора напряженно-деформированного состояния прокатываемой заготовки, схемы прокатки и выбора вида внешних усилий, был использован метод трехмерного конечно-элементного моделирования и проанализированы результаты этого моделирования.

Моделирование позволило резко уменьшить количество опытных прокаток реальных заготовок, а полученные результаты моделирования очень близко совпали с результатами прокатки опытных образцов.

На измельчение структуры основное влияние оказывает система тангенциальных напряжений, четко просматриваемых при моделировании. Оценка достоверности моделирования выполнялась по энергетическим параметрам.

Были подготовлены и проведены плавки слитков сплавов 01390 и 01391 с последующими замерах в них размеров первичных кристаллов кремния перед прокаткой (Табл. №№ 3,4).

Табл. № 3

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

В соответствии с планом проведения экспериментов были проведены на стане ПВП 20-60 серии прокаток заготовок из силуминовых сплавов с варьированием температуры нагрева заготовок и величины степени деформации за каждый проход.

Табл. № 4

Параметры прокатки заэвтектических силуминов и оценка качества прокатанных прутков.

№ слитка / сплав	Темп-ра прокатки, °С	№ перехода	Диаметр прутка, мм	Вытяжка за переход	Деформация за переход, %	Суммарная вытяжка	Суммарная деформация, %	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 перекаса в валках
576 01390	400-420	1	110	2,25	55	-	-	«»
193 01390, 193-1-1	490-500	диам слитка 100 мм	70	2,04	51	2,04	51	хороший, но отвалился 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 перекаса на 2-м переходе
194 01391, 194-1-1	«»	«»	70 50	2,04 1,96	51 49	2,04+ 1,96= 4	36 ?	хороший
194 01391, 194-1-2	«»	«»	60	2,78	64	2,78	64	хороший

При применении нескольких переходов в зависимости от суммарной степени деформации, структура силуминов претерпевает существенные изменения.

Сложную деформационную картину при поперечно-винтовой прокатке показывает макроструктура металла в зоне очага деформации (переход от слитка к прутку или от большого диаметра прутка к меньшему) и самих прутков.

Деформационный механизм изменения структурных составляющих сплава заметно отражается прежде всего на размерах и форме кристаллов первичного кремния в зависимости от степени суммарной деформации, как это видно по данным Табл. № 5 и диаграммам (рис. 17).

Табл. № 5

Влияние суммарной степени деформации при поперечно-винтовой прокатке 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</i> слиток диаметром 178 мм (после обточки 165 мм) со средними размерами кристаллов кремния 30-40 мкм и максимальными размерами до 100 мкм			
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</i> слиток диаметром 114 мм (после обточки 100 мм) со средними размерами кристаллов кремния 20-30 мкм и максимальными размерами до 70 мкм			
70	51	10	20-30
60	64	10-15	25-30
<i>Исходный слиток</i> диаметром 114 мм (после обточки 100 мм) <i>после комплексного модифицирования</i> со средними размерами кристаллов кремния 10-30 мкм и максимальными размерами 9-50 мкм			
70	51	10-15	20-30
60	64	10-20	30-40

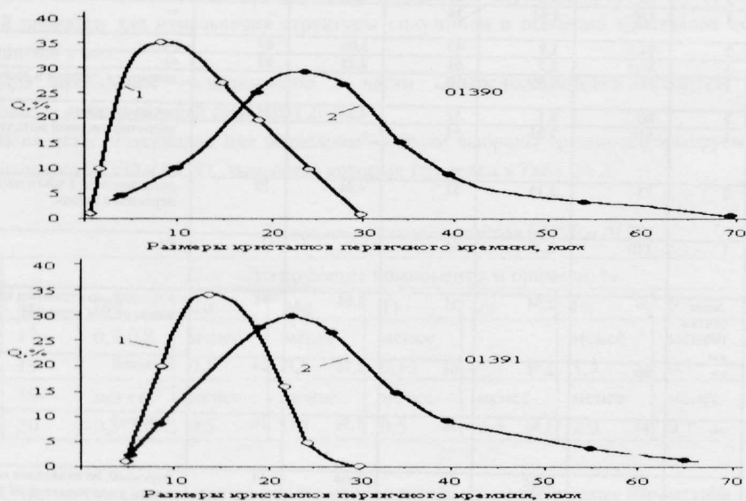


Рис. 17. Влияние деформации при поперечно-винтовой прокатке на эффективность измельчения кристаллов первичного кремния в заэвтектических силуминах 01390 (18% Si) и 01391 (20% Si):

1-пруток диаметром 70 мм (степень деформации 51%);

2-литая обточенная заготовка диаметром 100 мм с модифицированной структурой.

Анализ этих данных показывает исключительно сильное влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру деформированного металла. В сплаве 01391 имеются 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 достаточно большими.

Применение же поперечно-винтовой прокатки позволяет и в этом случае существенно повлиять на структуру прутка.

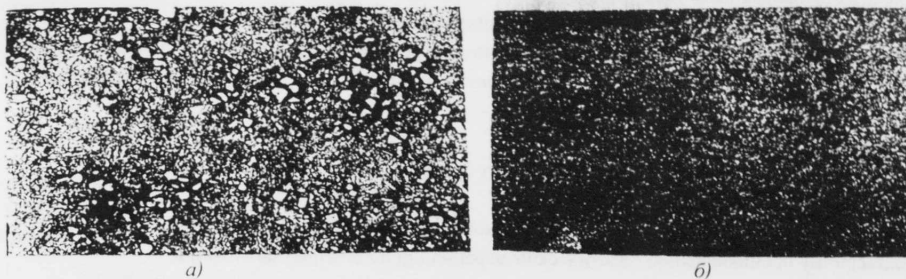


Рис. 18. Влияние поперечно-винтовой на микроструктуру слитков заэвтектического силумина марки 01390:

- а) слиток диаметром 114 мм (средний размер кристаллов кремния 20 мкм, $\times 125$);
б) прутки диаметром 70 мм (средний размер кристаллов кремния 10 мкм, $\times 200$).*

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. 18 а) в слитке ломаются в процессе поперечно-винтовой прокатки, образуя достаточно мелкие пластинки (рис. 18 б), при этом также измельчается эвтектическая основа сплава.

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 клетке.

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 ПРП 20-60 изготовлен в металле, смонтирован и эксплуатируется на заводе легких сплавов ВЛС, 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 одинаковых 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 деформации 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.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Ильин О.Ю., Панов Е.И., Шапиро В.Я. Конструкции оборудования и освоения поперечно-винтовой прокатки легких сплавов // Технология легких сплавов, 2000, № 5, с.39-46.

2. Панов Е.И., Ильин О.Ю. О качестве прутков и труб из легких сплавов, полученных поперечно-винтовой прокаткой // Технология легких сплавов, 2001, № 2, с.27-31.

3. Панов Е.И., Восканьянц А.А., Иванов А.В., Лушников В.М., Ильин О.Ю. Трехмерное конечно-элементное моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки // Технология легких сплавов, 2001, № 5-6, с.54-59.

4. Панов Е.И., Ильин О.Ю. Расширение технологических возможностей стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60 // Технология легких сплавов, 2002, № 2, с.41-52.

5. Эскин Г.И., Панов Е.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов разной шихтовой основы // Цветные металлы, 2002, № 8 (Сдана в печать).

6. Панов Е.И., Эскин Г.И., Ильин О.Ю. Оптимизация параметров поперечно-винтовой прокатки для получения катаных прутков из заэвтектических силуминов повышенного качества // Металлургия, 2002, № 7, (Сдана в печать).

7. Авторское свидетельство № 341544. СССР «Клеть косовалкового стана». Приоритет от 24 ноября 1970 г. Панов Е.И. и др.

8. Авторское свидетельство № 348250. СССР «Рабочая клеть трубопрокатного стана». Приоритет от 1971 г. Панов Е.И. и др.

Подписано в печать – 23 апреля 2002 г.
Объем – 1,4 уч.-изд. листа
Печать – офсетная. Тираж – 100 экз.

Отпечатано в типографии ОАО «ВИЛС»
г. Москва, ул. Горбунова, д.2