ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 8 август 2012

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГАРИБОВ Г.С.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЕВСЮКОВ С.А.
ЕРШОВ М.Ю.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КИДАЛОВ Н.А.
КОРОТЧЕНКО А.Ю.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ В.И.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ШЕСТАКОВ Н.А.
ШПУНЬКИН Н.Ф.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственный за подготовку и выпуск номера
ЛУТОВИНИНА О.Н.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу агентства "Роспечать" **81580**, по Объединенному каталогу "Пресса России" **39205**, по каталогу "Почта России" **60261**) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Факс (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Галкин А.Н., Гаманюк С.Б. Исследование слитков с охлаждающей прибыльной надставкой и полученных из них полых поковок 3
Артамонова Ю.С., Изотов В.А., Акутин А.А. Расчет верхней литниковой системы для получения отливок из алюминиевых сплавов 8
Летуновский А.П., Антонов А.А., Стеклов О.И. Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой 12

Кузнечно-штамповочное производство

Ростовцев Д.В., Дёмин В.А., Семёнов Е.И. Расчет размеров заготовки для получения кольца способом растяжения 17
Филатов А.А., Лагошина Е.В., Зейдель В.С., Середкин В.П. Изготовление заготовок втулок из листовой бериллиевой бронзы 20
Петрушина М.М., Евсюков С.А. Разработка технологического процесса штамповки профильных колец с двойными стенками методом совмещения вытяжки и отбортовки 22
Горленко А.М., Пашкевич А.Г., Осипов С.А., Мироненко В.В. Пневмотермическая формовка тонкостенных деталей из трубных заготовок 26
Кулик Г.Н. Исследование процесса прошивки 28

Прокатно-волочильное производство

Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Новый способ резки непрерывно-литых заготовок 35

Материаловедение и новые материалы

Жачкин С.Ю., Живогин А.А., Пеньков Н.А., Сидоркин О.А., Лазукин В.Ф. Повышение износостойкости деталей гидроприводов прессового оборудования . . . 38
Сурков В.А. Механические свойства интерметаллидных материалов на основе системы Fe–Al при воздействии плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления 41
Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Скрипкина Ю.В., Розина Т.Н., Бобрышев Р.В., Болдырев Ю.В. Повышение работоспособности плунжерных пар из стали (17...20)ХГТ комбинированной нитроцементацией 43

Информация

Назарян Э.А., Аракелян М.М., Морозов В.В. Оптимизация процессса формоизменения листового молибдена для выращивания монокристаллов 45

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал выходит при содействии:
Академии Проблем Качества Российской Федерации; Министерства образования и науки Российской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прессов; ЦНИИЧермет; ВНИИМЕТМАШ; ИМЕТ РАН; Каширского завода "Центролит"; АМУРМЕТМАШ; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; ФГУП ГНПП "Сплав"

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2012

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 8 August 2012

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
SEMENOV E.I.

Chairman Assistants:
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialist
LUTOVININA O.N.

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossii" **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Fax (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Rutsky D.V., Zyuban N.A., Galkin A.N., Gamanyuk S.B. Study of ingots with cooling feeder head and obtained from them hollow forgings . . . 3
Artamonova Yu.S., Izotov V.A., Akutin A.A. Calculation of top gating system for obtaining of castings made of aluminum alloys . . . 8
Letunovsky A.P., Antonov A.A., Steklov O.I. Removing of technological residual stresses in structures by low-frequency vibration treatment . . . 12

Forging and Stamping Productions

Rostovtsev D.V., Demin V.A., Semenov E.I. Calculation of blanks sizes for obtaining of ring by stretching method . . . 17
Filatov A.A., Lagoshina E.V., Zeydel' V.S., Seredkin V.P. Making of sleeves blanks made of sheet beryllium bronze . . . 20
Petrushina M.M., Evsyukov S.A. Engineering and analysis of combined drawing and hole – flanging processes . . . 22
Gorlenko A.M., Pashkevich A.G., Osipov S.A., Mironenko V.V. Pneumatic and thermal molding of thin-walled details from round billets . . . 26
Kulik G.N. Study of drifting process . . . 28

Rolling and Drawing Productions

Ovchinnikov D.V., Bogatov A.A., Erpalov M.V. New technique of sections cutting . . 35

Physical Metallurgy and New Materials

Zhachkin S.Yu., Zhivogin A.A., Pen'kov N.A., Sidorkin O.A., Lazukin V.F. Increase in wear resistance of press equipment hydraulic drive parts . . . 38
Surkov V.A. Mechanical properties of intermetallic materials based of Fe–Al system during influence of low-pressure high-frequency induction plasma . . . 41
Gadalov V.N., Petrenko V.R., Skripkina Yu.V., Rozina T.N., Bobryshev R.V., Boldyrev Yu.V. Increase in working capacity of plunger pairs made of steel (17…20)KhGT by combined carbonitriding . . . 43

Information

Nazaryan E.A., Arakelyan M.M., Morozov V.V. Optimization of sheet molybdenum forming for single crystals growing . . . 45

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses

Reprint is possible only with the reference to the journal "Blanking productions in mechanical engineering"

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2012

УДК 621.73.002.6:658.562

Д.В. Руцкий, Н.А. Зюбан, А.Н. Галкин, С.Б. Гаманюк
(Волгоградский государственный технический университет)

Исследование слитков с охлаждающей прибыльной надставкой и полученных из них полых поковок*

Представлены результаты исследования влияния условий кристаллизации головной части слитков на особенности строения, время кристаллизации, механизм образования и степени развития дефектов в кузнечных слитках и получаемых из них трубных поковок. Физическим моделированием кристаллизации стального слитка выявлены особенности затвердевания и образования дефектов усадочного происхождения. Приведены результаты исследований литой структуры слитков и степени и характера развития ликвации углерода, серы, фосфора по сечению слитка, расположения и размеров усадочных дефектов, а также механических свойств трубных заготовок, откованных из слитков, затвердевающих с различными характеристиками тепловой работы головной части.

Ключевые слова: кристаллизация; слиток; химическая, физическая, структурная неоднородность; поковки; распределение углерода; прибыльная надставка; теплоизоляция; захолаживание.

The results of research of terms influence of ingot top crystallization on structure features, crystallization time, formation mechanism and evolution of defects in forge ingots and pipe forgings, which are made of these ingots are presented. Features of solidification and defects formation of shrinkage origin in steel ingots is identified by physical modeling. The research results of cast structure of ingots and level and character of evolution of carbon, sulfur, phosphorus liquation of cross-section, location and size of shrinkage defects, mechanic properties of pipe billets, which are made of ingots, which are crystallized with different characteristics of thermal work of top are showed.

Keywords: crystallization; ingot; chemical, physical, structural inhomogeneity; forgings; carbon allocation; feeder head; thermal insulation; cooling.

Повышенные требования к изделиям тяжелого машиностроения обусловливают необходимость получения кованых заготовок высокого качества. Крупногабаритные кованные изделия: судовые валы, роторы турбогенераторов, корпусные и трубные заготовки для энергетических агрегатов изготовляются из кузнечных слитков, масса которых в 2 раза выше массы готового изделия. Увеличение массы слитка приводит к интенсивному развитию явлений усадки и ликвации и как следствие – повышенной физической, химической неоднородностей, и другим неконтролируемым дефектам, присущим процессу затвердевания больших масс металла [1].

Используемые кузнечные слитки в основном ориентированы на получение плотной осевой зоны, вследствие чего имеют значительный объем прибыльной части (в среднем до 20 %) и отличаются между собой соотношением высоты слитка к его среднему диаметру H/D и величиной конусности $k_{тс}$ [2, 3]. Большой объем прибыльной части ограничивает возможность эффективного снижения отходов слитка при его ковке. Также важной проблемой качества таких слитков является интенсивное развитие химической ликвации по высоте слитка (в частности углерода), что может привести к браку получаемых из них поковок.

Машиностроительные предприятия энергетической и транспортной отраслей производят поковки широкой номенклатуры, причем до 80 % из них являются полыми (валы роторов турбогенераторов, кольца, толстостенные трубы, обечайки, корпусные детали и др.) [4]. В этом случае, в целях уменьшения отходов при ковке, как правило, применяют удлиненные и

* Работа выполнена в рамках проекта МК-4034.2012.8 "Разработка оптимальной конфигурации и технологии отливки кузнечных слитков в вакууме с контролируемым развитием дефектных зон литого металла с целью повышения качества и надежности крупногабаритных изделий энергетического машиностроения".

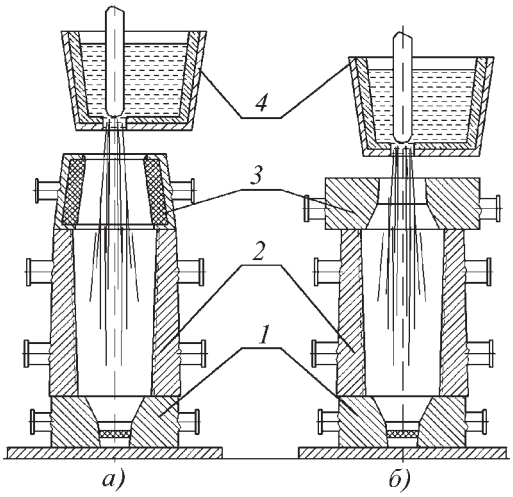


Рис. 1. Схема отливки слитков:
а – слиток с утепляющей прибыльной надставкой; *б* – слиток с захолаживающей прибыльной надставкой;
1 – поддон; *2* – изложница; *3* – утепляющая и ускоряющая кристаллизацию надставки; *4* – разливочный ковш

бесприбыльные слитки. Однако в связи с разнообразием конструктивных особенностей получаемых заготовок не всегда данные технологические мероприятия приносят ожидаемый результат.

Для улучшения качественных характеристик изделий и экономических показателей производства перспективным направлением является применение слитков с захоложенной верхней частью [5]. Вместо "классической" прибыльной надставки применяют надставку-холодильник с относительным объемом 4 % (рис. 1). В этом случае компенсация усадки в теле слитка будет продолжаться до тех пор, пока поверхности раздела фронта кристаллизации, движущиеся в горизонтальном направлении от боковых стенок изложницы, не сблизятся на достаточную величину, чтобы обеспечить в осевой зоне получение вытянутой узкой усадочной раковины. Металл центральной части тела слитка со следами усадочной раковины удаляется в ходе последующей обработки прошивкой или сверлением заготовки.

Химический состав металла, геометрические размеры слитков и технологические параметры их разливки приведены в табл. 1, 2.

Результаты исследований макроструктурной, физической и химической неоднородностей слитков стали 38ХН3МФА, отлитых с обычными утепляющими надставками и надставкой-холодильником, представлены в табл. 3 и 4.

Из приведенных данных видно, что в опытном слитке зона осевой рыхлости имеет почти в 2 раза меньший диаметр и меньшую протяженность по сравнению с обычным слитком. Это объясняется сокращением зоны затрудненного питания на заключительном этапе кристаллизации слитка и соответственно лучшими условиями ее подпитки жидким металлом.

Усадочная раковина в опытном слитке сконцентрирована в осевой части и имеет незначительное развитие по ширине (23,1 % от его среднего диаметра), при этом значительно развита по высоте до половины высоты его тела (50,4 % от высоты тела слитка) (см. табл. 3). Такое расположение усадочной раковины обеспечивает ее практически полное удаление при деформационной обработке слитка и получении полой поковки.

Анализ данных по развитию химической неоднородности (см. табл. 4) показал, что в слитке с надставкой-холодильником она выражена существенно слабее, что можно объяснить более равномерным распре-

1. Химический состав ковшевых проб стали, % мас.

Форма слитка	Масса слитка $m_{сл}$, т	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V
Обычный	4,5	0,41	0,52	0,39	0,015	0,017	0,11	0,15	0,12	–	–
Опытный	1,53	0,34	0,48	0,33	0,014	0,008	1,42	3,25	0,10	0,38	0,11

2. Геометрические размеры слитков и технологические параметры их разливки

Форма слитка	$m_{сл}$, т	H/D	$k_{тс}^{*}$	$V_{пр}$	$T_{вып}$	$T_{разл}$	$\tau_т$	$\tau_{пр}$
			%		°C		мин	
Обычный	4,5	2,16	1,5	16,67	1665	1570	2,70	1,30
Опытный	1,53	1,99	6,1	4,00	1640	1570	1,55	1,10

* Здесь и далее приведены значения конусности на обе стороны.

Обозначения: $V_{пр}$ – объем прибыльной надставки; $T_{вып}$ – температура выпуска стали из печи; $T_{разл}$ – температура разливки стали; $\tau_т$ – время заливки тела слитка; $\tau_{пр}$ – время заливки прибыли.

3. Структурные параметры слитков

Параметр	Слиток		Параметр	Слиток	
	с утепляющей надставкой	с захолаживающей надставкой		с утепляющей надставкой	с захолаживающей надставкой
Корковая зона:			% к площади осевого темплета тела слитка	26,7	3,5
средняя ширина зоны, мм	15	10,5	средний размер кристаллов, мм	5,1	3,6
% к площади осевого темплета*	5,7	3,0	средний угол наклона, °	53,2	62
Зона столбчатых дендритов:			Зона осевой рыхлости:		
средняя ширина зоны, мм	55	96,1	протяженность, мм	720	391
% к площади осевого темплета	11,9	53,2	% к высоте тела слитка	52,2	39,9
средний размер кристаллов, мм	49	42	максимальный диаметр, мм	100	37
средний угол наклона к горизонту, °	22	14	% к среднему диаметру слитка	15,6	8,0
Зона крупных различно ориентированных дендритов:			% к площади осевого темплета тела слитка	6,6	1,7
% к площади осевого темплета	49,0	31,4	средний размер кристаллов, мм	5,7	12,5
средний размер кристаллов, мм	9,1	8,6	средний угол наклона, °	54	53
средний угол наклона, °	41,7	57	Усадочная раковина:		
Конус осаждения:			протяженность, мм	220	494
высота, мм	685	204	% к высоте тела слитка	–	50,4
% к высоте тела слитка	43,1	20,8	% к площади осевого темплета тела слитка	–	7,2
максимальный диаметр, мм	487	158	максимальный диаметр в теле слитка, мм	–	111,4
% к среднему диаметру тела слитка	76,1	34,3	% к среднему диаметру тела слитка	–	23,1

*Площадь осевого темплета составляет 28644,6 и 24921,5 см^2 для слитков с утепляющей надставкой и захолаживающей надставкой соответственно.

делением по высоте слитка таких сильно ликвирующих элементов, как углерод, сера, фосфор.

Замедление процесса перераспределения ликвирующих примесей и уменьшение степени развития химической неоднородности обусловлены более интенсивными процессами кристаллизации, проходящими в опытном слитке, за счет охлаждающего воздействия не только со стороны поддона, но и в верхней части слитка со стороны массивной прибыли-надставки. Для уточнения механизма кристаллизации слитка с захолаживающей прибыльной надставкой было проведено физическое моделирование процесса его затвердевания с использованием раствора гипосульфита, заливаемого в прозрачную модель изложницы [6].

Результаты моделирования показали (рис. 2), что в опытном слитке скорость нарастания твердой фазы в горизонтальном направлении существенно превыша-

4. Химическая неоднородность слитков

Параметр	Слиток	
	с утепляющей надставкой	с захолаживающей надставкой
Положительная ликвация, %:		
углерода	+10,8	+3,0
серы	+18,8	+7,1
фосфора	+18,0	0
Отрицательная ликвация, %:		
углерода	–8,1	–3,0
серы	–6,3	–14,3
фосфора	–9,1	–11,1
Суммарная ликвация, %:		
углерода	18,9	6,0
серы	25,1	21,4
фосфора	27,1	11,1

ет аналогичный параметр для сравнительного слитка, а к концу затвердевания, когда процессы перераспределения примесей получают наибольшее развитие, эта разница достигает 2 раз и более.

Таким образом, интенсивное развитие процесса последовательной кристаллизации способствует подавлению ликвационных процессов и выравниванию химического состава металла по высоте и сечению слитка.

Полученные результаты показали, что слиток с захоложенной верхней частью может быть использован для производства полых поковок. Узкая усадочная раковина, сконцентрированная в осевой зоне и верхней части слитков, будет гарантированно удаляться при ковке слитков и сверлении полученных поковок.

Для подтверждения результатов исследования была проведена промышленная отливка слитков стали 15Х2МФА массой 13,56 и 12,14 т, геометрические размеры которых и технологические параметры их разливки приведены в табл. 5.

Из данных слитков ковкой получали полые заготовки, из которых в соответствии со схемой на рис. 3 отбирали пробы для проведения химического анализа и определения механических свойств.

Схема распределения углерода в исходных сравнительном и опытном слитках представлена на рис. 4.

Нижняя часть слитка традиционной формы характеризуется пониженным содержанием углерода (см. рис. 4, *а*). В подприбыльной области содержание углерода повышено, что соответствует общепринятым представлениям о ликвации в крупных кузнечных слитках. В слитке с захоложенной верхней частью наблюдается более однородное распределение углерода (см. рис. 4, *б*).

Область скопления ликвирующих примесей в опытном слитке менее выражена и сосредоточена в центральной части слитка, удаляемой в отходы, годная часть поковки характеризуется высокой однородностью по химическому составу. Особенностью слитка с захоложенной верхней частью является то, что как в нижней, так и в верхней его частях ликвация имеет отрицательные значения. Такое различие в распределении элементов в объеме слитков с различными типами надставок объясняется особенностями их кристаллизации. В слитке традиционной формы в последнюю очередь затвердевает головная часть

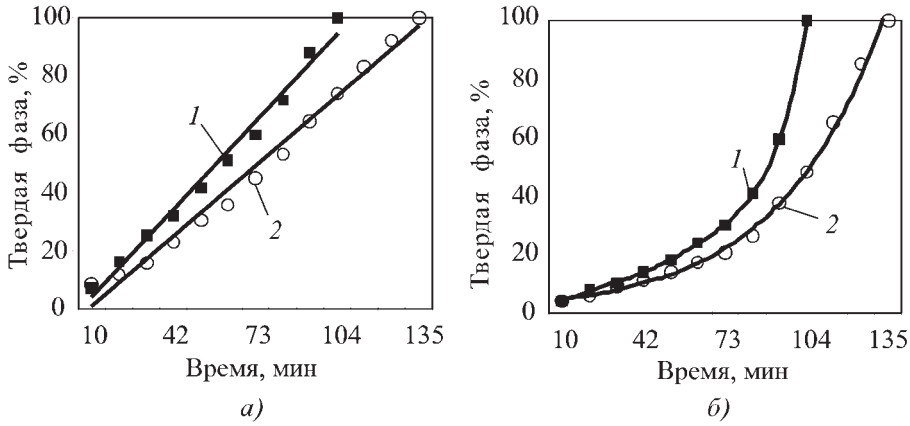


Рис. 2. Продвижение вертикального (*а*) и горизонтального (*б*) фронтов кристаллизации слитков с различными надставками:
1 – надставка-холодильник; *2* – утепляющая надставка

5. Геометрические размеры слитков и технологические параметры их разливки

$m_{сл}$, т	H/D	$k_{тс}$	$V_{пр}$	$T_{вып}$	$T_{разл}$	$\tau_т$	$\tau_{пр}$
		%		°С		мин	
13,56	2,05	9,0	17,6	1655	1570	5,10	3,80
12,14	2,05	9,0	4,0	1655	1570	5,15	2,35

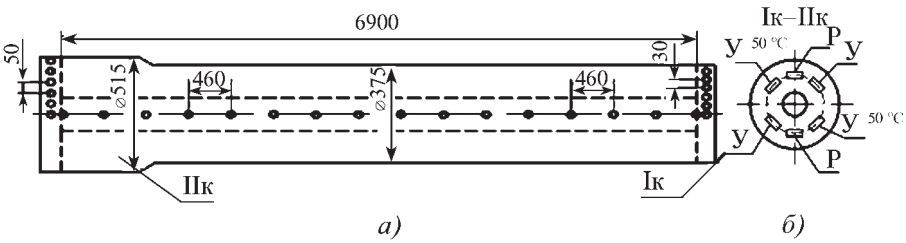


Рис. 3. Схема отбора проб для химического анализа из трепанга (*а*) и концевых дисков поковок (*б*) из слитков массой 13,56 и 12,14 т:
Iк – первый конец поковки, соответствующий донной части слитка; IIк – второй конец поковки, соответствующий прибыльной части слитка; У – ударные образцы; Р – разрывные образцы

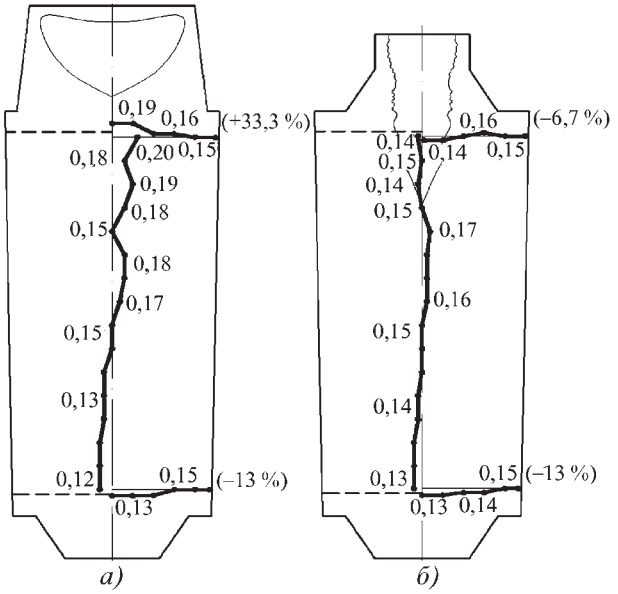


Рис. 4. Распределение углерода по высоте и сечению слитков массой 13,56 т, отлитых в изложницу с утепляющей надставкой (*а*), и массой 12,14 т с надставкой-холодильником (*б*)

слитка, поэтому максимальное количество ликвирующих примесей, оттесняемых в процессе кристаллизации, концентрируются в ней и в подприбыльной области. При использовании надставки-холодильника последние порции металла, обогащенные ликватами, застывают в узкой центральной части слитка, затвердевающей последней, а верхние и нижние горизонты практически идентичны по химическому составу.

Расчет суммарной ликвации углерода сравниваемых слитков показал, что в обычном слитке она составляет 46,3 %, а в слитке с захоложенной верхней частью 6,3 %, что свидетельствует о существенном подавлении развития химической неоднородности.

Готовые полые изделия проходили штатные испытания в соответствии с нормативно-техническим регламентом. Пробы для исследования качественных характеристик металла полых поковок отбирали из колец толщиной 20 мм. Контролю подвергали два кольца, по одному от каждого конца поковки, что соответствует донной и головной частям слитка (см. рис. 4).

Контроль макроструктуры и ликвационной неоднородности на металле концевых дисков не выявил каких-либо отклонений. Все изделия, изготовленные из слитков с захоложенной верхней частью, соответствовали предъявляемым требованиям.

Для сопоставления уровня механических свойств металла промышленных поковок, изготовленных из опытных (с захоложенной верхней частью) и обычных – прибыльных слитков, проведено сравнение механических свойств (см. рис. 4, *б*). При этом сравнивали усредненные значения по данным испытаний нескольких поковок (табл. 6).

Анализ данных табл. 6 показал, что прочностные характеристики металла и значения относительного удлинения опытных и сравнительных слитков находятся на одном уровне. Значения коэффициента не-

6. Сравнение коэффициента неравномерности механических свойств по противоположным концам поковок из опытных и традиционных слитков

Параметр	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ	ψ	*KC*U, кДж/м^2
	МПа		%		
Слиток с надставкой-холодильником					
Разница между максимальным и минимальным значениями	2,3	5,3	2,2	6,5	14
Коэффициент неравномерности механических свойств, %	4,8	3,3	11,4	9,6	5,7
Слиток с утепляющей надставкой					
Разница между максимальным и минимальным значениями	129	117,5	4,5	9,2	26,9
Коэффициент неравномерности механических свойств, %	19,1	15,3	23,4	13,6	11
Изменение разброса механических свойств, раз	4	4,7	2	1,4	1,9

равномерности механических свойств по концам поковок, изготовленных из слитков с захоложенной верхней частью, в 1,4–4,7 раз меньше, чем в поковках из слитков традиционной формы. Это свидетельствует о повышении качества полых поковок, полученных из слитков с захоложенной верхней частью, что делает их производство более технологичным и экономически целесообразным.

Выводы

Изменение теплофизических условий кристаллизации кузнечных слитков в результате применения захолаживающих прибыльных надставок обеспечивает преимущественное продвижение фронта затвердевания в горизонтальном направлении и ускорение темпа кристаллизации в головной части слитка.

Сравнение слитков, отлитых с различным утеплением головной части, показало, что слитки с ускоренной кристаллизацией головной части обладают повышенной структурной и химической однородностью, а также рациональной формой и расположением усадочной раковины. Такое расположение усадочной раковины позволяет при производстве полых изделий полностью удалить ее в отходы.

Исследование качества металла полых поковок, полученных из обычного прибыльного слитка и слитка с захоложенной верхней частью массой 13,56 и 12,14 т, показало существенное возрастание равномерности распределения механических свойств по объему поковок из опытных слитков, что обусловлено подавлением ликвационных процессов и повышением однородности химического состава в исходном слитке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Жульев С.И., Зюбан Н.А.** Производство и проблемы качества кузнечного слитка. Волгоград: РПК "Политехник", 2003. 168 с.

2. **Дурынин В.А., Солнцев Ю.П.** Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения. СПб.: Химиздат, 2006. 272 с.

3. **Дуб В.С., Дуб А.В.** Факторы управления процессами затвердевания сплавов // Электрометаллургия. 2006. № 11. С. 18–22.

4. **Жульев С.И.** Оптимизация процессов производства кузнечных слитков для поковок ответственного назначения с использованием САПР-технологий: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 1991. 372 с.

5. **Шамрей В.А., Жульев С.И.** Новая форма кузнечного слитка для изготовления полых кованых изделий // Металлург. 2007. № 11. С. 49–54.

6. **П. м. 110667 РФ, МПК B 22 D 7/08.** Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в модели изложницы / Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, С.Б. Гаманюк, С.Н. Никуйко, А.Н. Галкин. ВолгГТУ, 2011.

Дмитрий Владимирович Руцкий, канд. техн. наук;
Николай Александрович Зюбан, д-р техн. наук;
Антон Николаевич Галкин,
tecmat@vstu.ru;
Сергей Борисович Гаманюк

УДК 621.74.041

Ю.С. Артамонова, В.А. Изотов, А.А. Акутин
(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва)

Расчет верхней литниковой системы для получения отливок из алюминиевых сплавов

Для обеспечения направленного затвердевания отливок из алюминиевых сплавов при заполнении сверху необходимо, чтобы исполняемые размеры литниковой системы обеспечивали подачу металла без образования вторичного шлака, необходимый температурный режим заливки и последовательное затвердевание. Этим требованиям отвечает представленная методика расчета.

Ключевые слова: заливка сверху; направленное затвердевание; критическое значение силы удара; коэффициент теплоотдачи.

To ensure directed solidification of castings made of aluminium alloys by pluvial gating system it is necessary that the executable sizes of gating system ensures the metal feeding without formation of repeated slag, the requisite temperature regime of pouring and consecutive solidification. These requirements provided by presented method of calculation.

Keywords: top pouring; directed solidification; critical value of impact power; heat transfer coefficient.

Для получения отливок из цветных сплавов применяют различные виды литниковых систем. В основном это сифонная и вертикально-щелевая литниковые системы. Известно, что алюминиевые сплавы сверху заливать нельзя. Однако на производстве используют верхний подвод расплава в полость литейной формы, получая при этом годные отливки.

Верхняя литниковая система обеспечивает хорошую заполняемость при кратчайшем пути металла до формы, создает наиболее благоприятные условия для

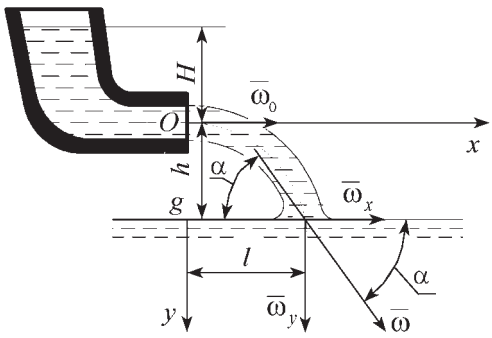


Рис. 1. Схема падения струи расплава под углом к поверхности

последовательной направленной кристаллизации отливки снизу к прибылям, не вызывает развития местных перегревов формы и связанных с этим дефектов. Она наиболее проста по выполнению, легко удаляется при обрубке литья и требует наименьшего по сравнению с другими типами литниковых систем расхода металла за счет уменьшения размеров прибылей.

Основной недостаток этого типа систем – каскадный сброс расплава в форму, приводящий к его перемешиванию, захвату воздуха, образованию пены и ее замешиванию внутрь отливки. Поэтому необходимо осуществлять проверку по силе удара струи металла о поверхность ванны расплава, для того чтобы обеспечить отсутствие возникновения в теле отливки газовых дефектов.

При верхнем подводе расплава струя падает под углом к поверхности формы, а затем к зеркалу расплава, т.е. начальная скорость ω_0 направлена не вертикально и течение расплава будет криволинейным.

Рассмотрим падение расплава с высоты h со скоростью ω_0, как показано на рис. 1. Сопротивлением воздуха пренебрегаем.

Для описания течения необходимо выбрать две оси координат – x и y. Начало отсчета координат совместим с плоскостью сечения выходного отверстия. Движение струи расплава описывается уравнениями:

$$\omega_x = \omega_0, \quad x = \omega_0 t, \tag{1}$$

$$\omega_y = gt, \quad y = \frac{g t^2}{2}, \tag{2}$$

где g – ускорение свободного падения струи, $g = 9{,}81$ м/с^2; t – время падения струи расплава, с; ω_0 – скорость течения жидкости в отверстии, м/с:

$$\omega_0 = \mu \sqrt{2 g H}, \tag{3}$$

где H – металлостатический напор, м; μ – коэффициент расхода расплава в верхней литниковой системе, $\mu = 0{,}6$.

Из законов физики уравнение траектории струи расплава имеет следующий вид:

$$y = \frac{g}{2\,\omega_0^2} x^2. \tag{4}$$

Следовательно, струя расплава движется по параболе, а ее скорость в любой момент времени направлена по касательной к параболе, тогда модуль скорости определяется по формуле

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} = \sqrt{\omega_0^2 + (g\,t)^2}. \tag{5}$$

Из уравнения (2) находим:

$$h = \frac{g t^2}{2}, \tag{6}$$

где h – высота падения струи расплава, м.

Время падения струи на поверхность формы или расплава:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \tag{7}$$

За это время струя расплава в горизонтальном направлении пролетит расстояние l – дальность полета:

$$l = \omega_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}. \tag{8}$$

Модуль скорости струи расплава в этот момент времени:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + 2gh}. \tag{9}$$

Зная высоту падения расплава и дальность полета, можно определить угол падения струи расплава на поверхность формы:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{2\mu}\sqrt{\frac{h}{H}}. \tag{10}$$

Скорость, с которой струя падает на поверхность расплава, вычисляется по формуле [1]:

$$\omega = \sqrt{2\,g\,(\mu^2 H + h)}, \tag{11}$$

тогда сила нормального давления струи (сила удара) расплава при таком течении:

$$N = Q\,\rho\,\omega \sin\alpha$$

или

$$N = 8\,\rho\,\pi\,l_0^2\,g\,\mu\sqrt{H\,(\mu^2 H + h)}\,\sin\alpha, \tag{12}$$

где Q – расход расплава, м^3/с:

$$Q = f_{\text{отв}}\,\omega_0, \tag{13}$$

где $f_{\text{отв}}$ – площадь поперечного сечения отверстия, м^2; ρ – плотность сплава, кг/м^3; l_0 – приведенный размер питателя, м:

$$l_0 = \frac{F}{P}, \tag{14}$$

где F – площадь поперечного сечения питателя, м^2; P – периметр поперечного сечения питателя, м.

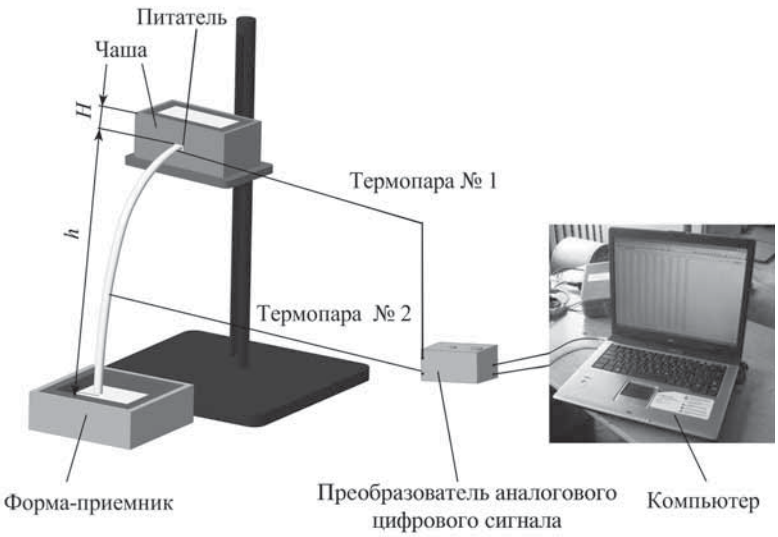


Рис. 2. Экспериментальная установка

По данным Б.О. Ботука (Гидравлика. М.: Высшая школа, 1962.), критическое значение силы удара струи, падающей под углом 90° к поверхности расплава, составляет 0,28 Н. Следовательно, зная критическое значение силы удара струи $N_{кр}$ и угол падения, из формулы (12) можно определить максимальный приведенный размер питателя, обеспечивающий отсутствие в отливке газовых дефектов:

$$l_{0\,max} = \sqrt{\frac{N_{кр}}{8\,\rho\,\pi\,g\,\mu\,\sqrt{H\,(\mu^2 H + h)\sin\alpha}}}\,. \qquad (15)$$

Для обеспечения направленного затвердевания отливок при заполнении сверху необходимо, чтобы заполнение полости литейной формы происходило при температуре, близкой к температуре ликвидус, и температуру заливки следует выбирать, учитывая тепловые потери при падении расплава в полости литейной формы и в каналах литниковой системы.

Для определения охлаждения расплава в струе разработана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 2. Установка состоит из чаши, формы-приемника, блока измерения падения температуры и термопар. Чаши изготовляли из песчано-глинистой смеси с изменяемыми размерами питателей: высота питателя $h_{пит}$ = 3; 5 и 7 мм; ширина питателя b = 15 мм; напор в чаше H = 0,05; 0,1 м; высота падения струи h = 350 мм.

Эксперименты проводили на сплаве АК12. Температуру в струе замеряли на высоте h_1 = 150 мм с помощью термопар (ХА, диаметр 0,02 мм) и измерительного устройства. Термопару № 1 устанавливали в питатель, а термопару № 2 – в струю расплава. Некоторые результаты представлены на рис. 3 и в таблице.

Из результатов экспериментов можно сделать вывод, что потери температуры в струе расплава при верхнем подводе и выбранных исполняемых размерах литниковых каналов и параметров литья незначительны и составляют 2...5 °С.

Таким образом, с учетом экспериментальных и теоретических результатов исследования истечения расплава из верхней литниковой системы сформулирована методика расчета исполняемых размеров верхней литниковой системы для литья алюминиевых сплавов:

1. Определение времени заливки $\tau_{зал}$, с:

$$\tau_{зал} = A\,M^n\,, \qquad (16)$$

где A и n – постоянные, значения которых по данным различных исследований находятся в широких пределах, рекомендуемые значения для алюминиевых сплавов: A = 0,06; n = 0,717 (по данным Г. Дросселя, М. Роланда); M – масса отливки, г.

2. При заливке сверху вниз узким местом считается питатель.

Определение площади узкого места $F_{пит}$, м^2:

$$\Sigma F_{пит} = \frac{G}{\tau_{зал}\,\rho\,\mu\,\sqrt{2\,g\,H}}\,, \qquad (17)$$

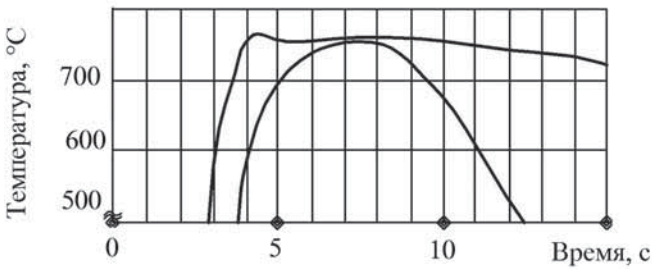


Рис. 3. Эксперимент № 1:
$h_{пит}$ = 3 мм; H = 50 мм; ΔT = 4,7 °С

Результаты экспериментов по определению теплоотдачи струи расплава

Номер эксперимента	Высота питателя, $h_{пит}$, м	Приведенный размер питателя l_0, м	Напор H, м	Температура заливки $T_{зал}$, м	Изменение температуры ΔT, °С
1	0,03	0,00125	0,05	1039	4,7
2			0,1	1013	3,7
3	0,005	0,00188	0,05	973	4,1
4			0,1	1089	2,4
5			0,1	993	2,3
6	0,007	0,00239	0,05	973	3,7
7			0,1	1013	2,2

где G – масса отливки вместе с массой литниковой системы, кг;

$$G = m\,G_{отл} + G_{л.с} = m\,G_{отл} + 20\,\%\,G_{отл}\,, \qquad (18)$$

где m – число отливок; $G_{отл}$, $G_{л.с}$ – масса отливки и литниковой системы.

3. Определение геометрических параметров питателя. При этом должно выполняться следующее соотношение:

$$h_{пит} < \delta_0\,, \qquad (19)$$

где δ_0 – толщина стенки, к которой подведен питатель, м.

4. Определение ширины питателя b, м:

$$b = \frac{\Sigma\,F_{пит}}{k\,h_{пит}}\,, \qquad (20)$$

где k – число питателей.

Проверка по силе удара струи падающего на поверхность формы расплава:

$$l_0 \le l_{0\,max}\,. \qquad (21)$$

6. Площадь стояка $F_{ст}$, м^2, определяется из соотношения:

$$F_{пит} : F_{ст} = 1:1\,. \qquad (22)$$

7. Температура заливки вычисляется по выражению:

$$T_{зал} = T_{л} + \Delta T_{м} + \Delta T_{л.с} + \Delta T_{стр}\,, \qquad (23)$$

где $T_{л}$ – температура ликвидус сплава, К; $\Delta T_{м}$ – перегрев расплава над температурой ликвидус, К, рекомендуется в диапазоне 40...60 °С; $\Delta T_{л.с}$ – потери теплоты расплава при течении в каналах литниковой системы, К; $\Delta T_{стр}$ – потери тепла при падении струи расплава в полости литейной формы, К, $\Delta T_{стр} = 2...5$ °С.

Потери температуры в каналах литниковой системы определяются по зависимостям, полученным в работе [2]:

$$\frac{\Delta T_{л.с}}{T_{зал}} = \left(0{,}936\left(\frac{\mathrm{Re}_{\delta ж}\;l_{0\,л.к}}{L_{л.к}}\right)^{-0{,}75}\right), \qquad (24)$$

где $\mathrm{Re}_{\delta ж}$ – критерий Рейнольдса, определяется для каждого литникового канала, в котором определяется охлаждение расплава:

$$\mathrm{Re}_{\delta ж} = \frac{\omega_{л.к}\,l_{0\,л.к}}{\nu}\,, \qquad (25)$$

где ν – кинематическая вязкость расплава, м^2/с; $L_{л.к}$ – длина литникового канала, м; $l_{0\,л.к}$ – характерный размер элемента литниковой системы, м:

$$l_{0\,л.к} = \frac{F_{л.к}}{P_{л.к}}\,, \qquad (26)$$

где $F_{л.к}$ – площадь сечения литникового канала, м^2; $P_{л.к}$ – периметр сечения литникового канала, м.

8. Используя полученные расчетные данные исполняемых размеров литниковой системы, проводится математическое моделирование заполнения и затвердевания (например, с помощью пакета прикладных программ LVM FLOW-3D).

9. По полученным размерам усадочных дефектов выбираются размеры прибылей или холодильников, и моделирование заполнения и затвердевания осуществляется повторно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Возможность** применения дождевой литниковой системы для заливки форм сплавами на основе алюминия / Ю.С. Артамонова, В.А. Изотов, А.А. Акутин, Р.В. Барабанов // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 3–5.

2. **Изотов В.А.** Развитие методологии проектирования и расчета литниковых систем для отливок из алюминиевых сплавов: дис. ... д-ра техн. наук. Рыбинск, 2012.

Юлия Сергеевна Артамонова,
yulipyn@mail.ru;
Владимир Анатольевич Изотов, канд. техн. наук;
Алексей Анатольевич Акутин, канд. техн. наук

УДК 621.791.011

А.П. Летуновский *(ООО "Магнит плюс", г. Санкт-Петербург);*
А.А. Антонов, О.И. Стеклов *(РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва)*

Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой

Описана технология низкочастотной виброобработки, предназначенной для снижения уровня остаточных напряжений в различных конструкциях, позволяющая в ряде случаев отказаться от классической термической обработки. Эффективность метода подтверждена изучением распределения полей остаточных напряжений в различных конструкциях как до применения виброобработки, так и после ее применения. Также рассмотрена комплексная методика исследования полей остаточных напряжений, включающая в себя первичный анализ физическим методом с поиском зон с концентрацией напряжений и последующим уточнением величины напряжений малоразрушающим механическим методом.

Ключевые слова: методы оценки уровня остаточных напряжений; методы снижения уровня остаточных напряжений; низкочастотная виброобработка; остаточные напряжения; магнитоанизотропный метод; метод лазерной интерферометрии.

The technique of low-frequency vibration treatment intended to reduce the residual stresses in various structures is described. Using this method allows, in some cases refusing the classical heat treatment. The effectiveness of the method is confirmed by studying the distribution of residual stress fields in various designs to use as vibration treatment and after its application. It also describes comprehensive method of studying residual stress fields including the primary analysis of the physical method of finding areas of stress concentration and subsequent refinement of stress low stress values mechanical method.

Keywords: methods for assessing level of residual stresses; methods for reducing level of residual stress; low-frequency vibration treatment; residual stresses; magnetic and anisotropic method; method of laser interferometry.

Значительная часть металлоконструкций эксплуатируется в условиях сложного напряженно-деформированного состояния и воздействия природных и технологических сред, вызывающих необратимые физико-химические изменения в металле, снижающие эксплуатационную надежность конструкции.

Суммарные напряжения от рабочих нагрузок и остаточные технологические в условиях воздействия коррозионно-активных сред в связи с механохимическим эффектом могут повышать скорость общей коррозии и вызывать наиболее опасные виды разрушения – *коррозионное растрескивание под напряжением* (КРН) и коррозионную усталость (рис. 1). Например, около 70 % аварийных отказов магистральных газопроводов России вызваны КРН [1, 2].

По данным Международной ассоциации инженеров-коррозионистов NACE, ущерб от коррозии и затраты на борьбу с ней в США составили 3,1 % от ВВП (276 млрд дол.). По оценкам специалистов различных стран, эти потери в промышленно развитых странах составляют от 2 до 4 % валового национального продукта. При этом потери металла, включающие в себя массу вышедших из строя металлических конструкций, изделий, оборудования, составляют от 10 до 20 % годового производства стали [3].

Для предотвращения аварийных отказов важным является оценка уровня остаточных напряжений и разработка технологических методов их устранения.

Для каждого металла и сплава существуют предельные (критические) напряжения, а также ряд других параметров, которые определяют стойкость материала к коррозии. Проблема возникновения остаточных механических напряжений в металле известна давно и возникает на каждой стадии изготовления металлоконструкции: проката, резки, рубки, механической обработки, штамповки, вальцовки, сварки, а также раскрое заготовительных и сборочных процессов (рис. 2).

В связи с этим возникает необходимость в изучении и применении технологий, способных снизить остаточные напряжения в металле, уменьшая вероятность развития коррозии, предотвращая будущие разрушения еще на этапе строительства или проведения ремонтных работ. Одним из таких методов является *низкочастотная виброобработка* (НВО).

Сущность способа заключается в создании в сварных конструкциях после сварки переменных напряжений определенной величины с помощью механических вибраторов. Виброобработка осуществляется, как правило, на резонансных или близких к резонансным частотах в течение определенного промежутка времени. В ряде случаев виброобработку применяют взамен термической обработки, что экономичнее примерно в 10 раз, так как она имеет следующие преимущества [4]:

1. Необходимое для виброобработки оборудование является универсальным для различных конструкций, компактным и мобильным.

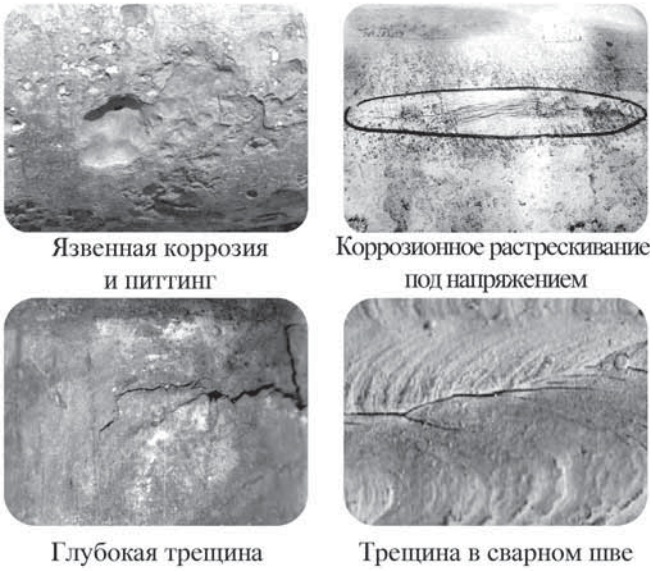


Рис. 1. Пример дефектов металла, возникающих при содействии остаточных напряжений в металле

2. Стоимость этого оборудования, а также затраты на его обслуживание и уход за ним относительно невелики.

3. Процесс снятия напряжений, в том числе сварочных, протекает быстро (максимальное время обработки 50-тонной детали составляет 30 мин).

4. Металл и поверхность деталей после обработки не претерпевает заметных физико-механических изменений (нет окалины, шлака, цветов побежалости и т.п.).

Понижение остаточных напряжений в процессе вибрации достигается в результате сочетания напряжений (вибрационных и остаточных), при определенных значениях которых материал становится пластичным.

Необходимым условием, при котором наблюдается снижение остаточных напряжений, является достижение предела текучести при вибрации сочетанием остаточных и вибрационных напряжений. Предел текучести при циклическом нагружении для некоторых материалов может быть снижен в 2 раза по сравнению с пределом текучести при статическом нагружении, в связи с чем при пульсирующих напряжениях небольшого уровня наблюдается снижение остаточных напряжений. Наибольшее уменьшение остаточных напряжений происходит уже при первом цикле, последующее снижение напряжений происходит менее интенсивно на отрезке до 100 циклов с постепенным затуханием этого процесса при дальнейшем циклическом нагружении.

При проведении работ по снятию остаточных напряжений и изменению напряженно-деформированного состояния требуется обязательный приборный контроль полей остаточных напряжений, картины их распределения в сварных соединениях. Учитывая, что уровень механических напряжений в реальной конструкции может значительно отличаться даже в двух незначительно удаленных друг от друга точках, важно видеть картину напряженного состояния элемента конструкции в целом до и после проведения работ. Своевременный контроль позволяет подбирать требуемые режимы и контролировать качество проведенных работ.

Для визуализации полей напряженного состояния исследуемой области металлоконструкции использовали аппаратно-программный комплекс "Сканер механических напряжений "Комплекс-2.05", основанный на магнитоанизотропии металла.

Данный прибор позволяет получить картограммы распределения параметров напряженного состояния исследуемой области конструкции – в основном металле, сварном шве и околошовной зоне – с предоставлением информации о наличии напряженных состояний в исследуемой зоне. Результаты документируются в виде картограмм *разности главных механических напряжений* (РГМН) и коэффициентов *концентрации механических напряжений* (КМН).

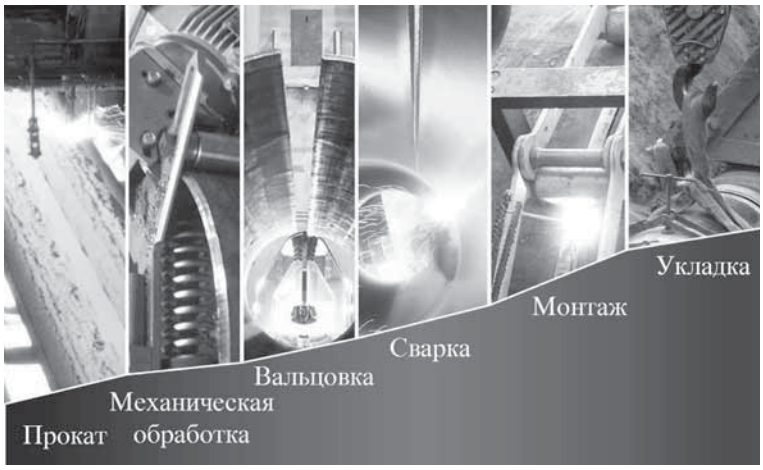


Рис. 2. Пример увеличения внутренних напряжений в металле на примере создания магистрального трубопровода

В качестве примера оценки напряженного состояния металла рассмотрим состояние участка трубы заводского изготовления (К65 ∅1420 мм с толщиной стенки 40 мм, рис. 3).

На рис. 3, *а* показана труба без изоляции с координатной сеткой, подготовленной для дефектоскопии. Проведя замеры, получили два вида карт: РГМН (цветная градиентная) и КМН (черно-белая).

На карте РГМН (рис. 4, см. обложку) вдоль проекции сварного шва в области линии 9 по вертикали наблюдается неоднородное распределение областей разности главных механических напряжений, которые варьируются от +40 до +30. В зонах от 7 до 9 и от 9 до 12 наблюдается резкое изменение напряженного состояния металла: знак РГМН меняется на противоположный с высоким градиентом перехода до –20 через нулевое значение. На карте КМН (см. рис. 4)

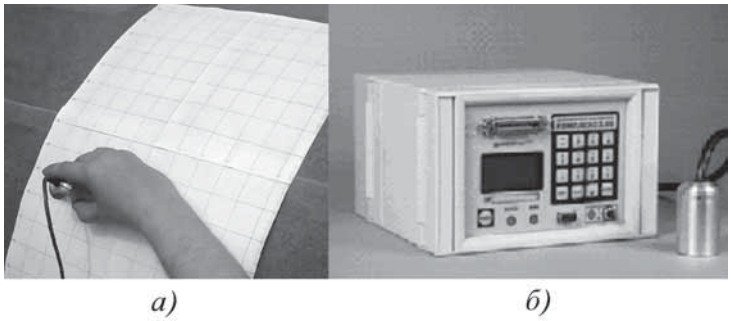


Рис. 3. Внешний вид диагностируемых труб (*а*) и сканера-дефектоскопа "Комплекс 2.05" (*б*)

в точках {5:8}, {7:4}, а также вдоль горизонтальной линии 9 присутствуют зоны концентраторов напряжений, что в сочетании с высоким градиентом является одним из основных факторов зарождения дефектов.

В обе стороны сварного шва в зоне изгиба трубы на карте РГМН наблюдаются гармонические повторения напряженности металла, возникновение которых обусловлено деформацией металла во время пошаговой формовки.

На основании выявленных диагностических признаков можно сделать вывод о целесообразности применения способов обработки металла для снятия остаточных механических напряжений. При этом главной целью мероприятия должно быть снижение коэффициентов концентрации напряжений, что исключает вероятность возникновения трещин.

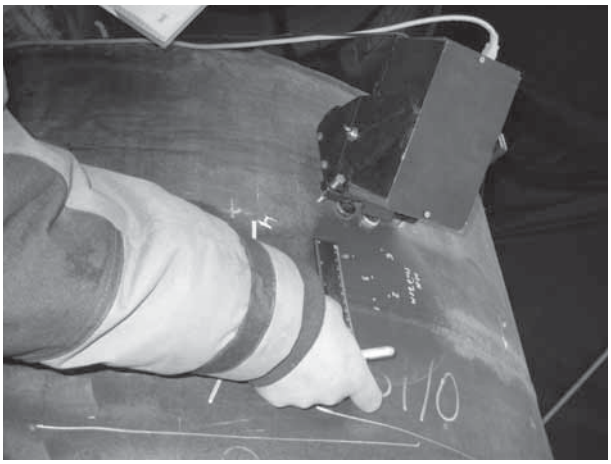


Рис. 5. Интерферометр "ДОН-5ЦЗ" для определения остаточных напряжений методом лазерной интерферометрии

Однако только контроля за распределением параметров напряженного состояния недостаточно, поэтому для получения достоверных данных о величине и направлении главных компонент напряженного состояния был применен метод физического измерения напряжений. В соответствии с ГОСТ Р 52891–2007 он называется методом лазерной интерферометрии.

Метод основан на упругой разгрузке, возникающей в локальной области исследуемого изделия, путем засверловки несквозного отверстия малого диаметра и глубины (2...5 и 1...2,5 мм соответственно). Регистрация возникающих деформаций в области засверленного отверстия проводится бесконтактным методом – с применением спекл-интерферометра. Точность определения деформации таким методом достигает ±130 нм, что позволяет определять деформации, вызываемые наличием невысоких остаточных напряжений (5 % от предела текучести).

В отличие от классического метода трепанации с фиксацией результатов с применением тензодатчиков метод лазерной интерферометрии позволяет получить точные данные по величине, знаку и направлению главных осей напряжений за 10...15 мин (в отличие от нескольких недель для метода трепанации) (рис. 5).

В настоящее время для снятия остаточных напряжений в металле можно применять технологию низкочастотной виброобработки на резонансных частотах. Технология применяется на предприятиях машиностроения, судоремонта, ТЭК и др. НВО как метод позволяет снизить напряжения во всей конструкции целиком, позволяя полностью или частично отказаться от термической обработки (рис. 6).

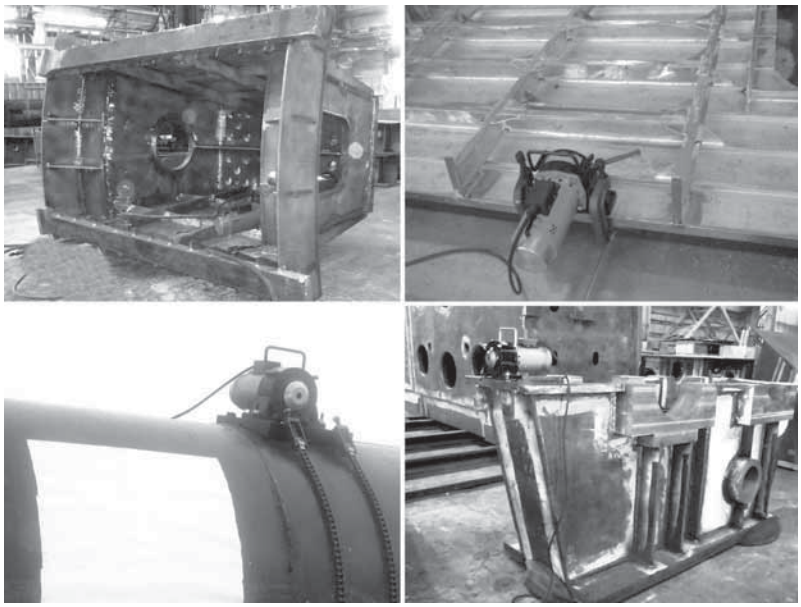


Рис. 6. Пример использования НВО на металлоконструкциях различного назначения

Примеры использования НВО

Обработка газотранспортной трубы. На рис. 7 показана газотранспортная труба без

Рис. 7. Газотранспортная труба с установленным вибратором и размещенными координатными сетками для дефектоскопии

изоляции диаметром 1420 мм и толщиной стенки 16,3 мм.

Металлоконструкцию размещают на виброгасителе, после чего на конструкцию (в данном случае на трубу), устанавливают вибратор с регулируемым дисбалансом. Определяют резонансные частоты данной трубы и осуществляют виброобработку в течение 15...30 мин. В результате возникновения в металле знакопеременных нагрузок на уровне зерна происходит перераспределение остаточных механических напряжений, что подтверждают проводимые замеры.

По результатам показаний прибора "Комплекс 2.05" до обработки в зоне сварного шва, расположенного по всей вертикальной длине линии 7, расположена зона разности главных механических напряжений с высоким градиентом от +50 до –70 (рис. 8, см. обложку). После обработки – напряжения сняты, и металл равномерно стабилизирован.

Схожую картину наблюдали и в отношении карт КМН до и после обработки. До обработки отчетливо видна полоса концентраторов механических напряжений, расположенных вдоль линии сварного шва. На карте КМН, полученной после обработки, концентраторы напряжений практически полностью отсутствуют, а все полученные числовые значения приближены к единице, что свидетельствует о снижении остаточных напряжений металла.

Обработка сваренного элемента конструкции шагающего экскаватора (рис. 9). В данном примере в связи с идентичной НВО опустим методику обработки, сконцентрировав внимание на замерах, проведенных до и после обработки виброобработки. На рис. 10 (см. обложку) видно, что до обработки на всей карте КМН присутствуют концентраторы механических напряжений. Основной объем концентраторов расположен в зоне между горизонтальными линиями 5 и 11. Концентраторы достигают в этой области пиковых значений 13...14, принимая в основном значения 7...9, что является значительной величиной концентрации механических напряжений на данном участке. В связи с

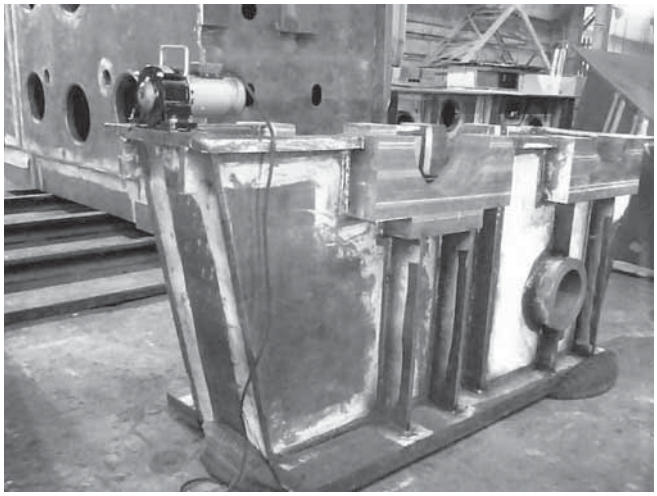


Рис. 9. Элемент конструкции шагающего экскаватора с установленным вибровозбудителем

этим необходимо обязательно применять методы снижения остаточных механических напряжений, либо проводить ремонтные работы на данном участке заново.

Карта РГМН подтверждает эту необходимость: между горизонтальными линиями 7 и 10 расположена зона разности главных механических напряжений с высоким градиентом от –100 до +50.

Было принято решение о применении НВО. Результат виден в правой части изображения рис. 10. Значения КМН снижены до 1, градиент РГМН равномерно распределен, что свидетельствует о напряжении, характерном для исходного основного металла, не подверженного дополнительной обработке.

Данный метод снятия остаточных механических напряжений постепенно получает все большее распространение в судостроении, машиностроении и энергетической промышленности. В отличие от дорогостоящей термической обработки, которую можно применить не в любой ситуации, НВО, не изменяя структуры металла при малых энергозатратах, способна с высокой степенью эффективности снизить остаточные напряжения в металлоконструкциях. Пример используемого оборудования приведен на рис. 11.

Остаточные напряжения в металле нередко являются причиной изменения геометрии металлоконструкции, вызывая «поводку металла». Низкочастотная обработка на резонансных частотах снимает напряжения в металле, возвращая металлоконструкцию к исходному геометрическому состоянию. Вибростабилизация обрабатываемых деталей позволяет достичь высокой точности при механической обработке. Снимая остаточные напряжения на сборочных секциях, НВО позволяет избежать неточностей при сборке конструкций, что отражается на трудоемкости.

Таким образом, технология низкочастотной виброобработки для снятия остаточных механических на-

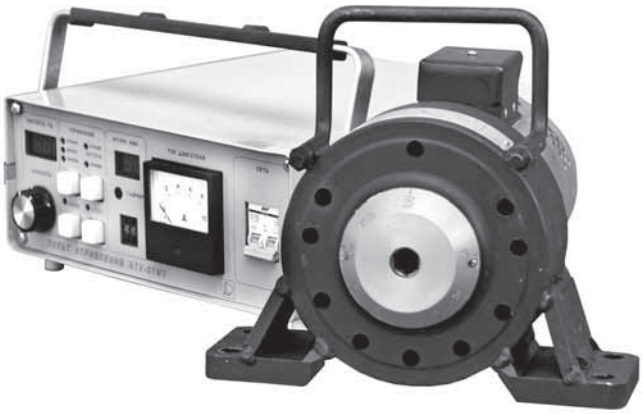


Рис. 11. Внешний вид технологического комплекса при виброобработке различных металлоконструкций

пряжений на металлоконструкциях заслуживает дальнейшего изучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Стеклов О.И.** Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
2. **Варламов Д.П., Стеклов О.И.** Дефекты коррозионного растрескивания в кольцевых сварных соединениях магистральных газопроводов двух климатических регионов России // Сварочное производство. 2012. № 2.
3. **Расходы** на коррозию и превентивные стратегии в США (Corrosion Costs and Preventive Strategies In the United States // NACE – Международная ассоциация инженеров-коррозионистов. 2012). http://www.nace.org/uploadedFiles/News/ccsupp.pdf (дата обращения: 18.05.2012).
4. **Сагалевич В.М., Савельев В.Ф.** Стабильность сварных соединений и конструкций. М.: Машиностроение, 1986. 264 с.
5. **Антонов А.А., Стеклов О.И., Сидорин Ю.В.** Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 3. С. 13–18.
6. **Штефан В.В., Тентлер А.В., Подольский В.Е.** Управление уровнем концентраторов механических напряжений деформированного состояния в стальных конструкциях // Контроль. Диагностика. 2003. № 7. С. 61–64.
7. **Артур Дж. Мак-Ивли.** Анализ аварийных разрушений. М.: Техносфера, 2010. 416 с.

Алексей Петрович Летуновский;
Алексей Алексеевич Антонов, канд. техн. наук;
Олег Иванович Стеклов, д-р техн. наук,
svarka@qubkin.ru

ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ: *учебное пособие.*

Е.А. Чернышов, В.И. Паньшин

Цена 400 р.

2011. 288 с. ISBN 978-5-94275-569-0

Приведены основные сведения о литейной форме и формовочных материалах, а также прогрессивных способах формообразования. Изложены сведения, необходимые для разработки литейной технологии при получении отливок в разовых песчаных формах. Даны задачи по анализу и улучшению технологичности отливок, примеры и задания для разработки технологического процесса изготовления отливок. Изложена классификация дефектов и причины их образования.

Предназначено для студентов специальностей «Литейное производство черных и цветных металлов» и «Машины и технология литейного производства» при выполнении курсового и дипломного проектирования, бакалаврской работы и магистерской диссертации.

Может быть использовано инженерно-техническими работниками, работающими в литейном производстве, преподавателями высших и средних учебных заведений и на курсах повышения квалификации.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.98

Д.В. Ростовцев, В.А. Дёмин, Е.И. Семёнов
(Московский государственный индустриальный университет)

Расчет размеров заготовки для получения кольца способом растяжения

Рассмотрен вопрос определения размеров заготовки для получения кольца способом растяжения. Метод получения колец растяжением запатентован и позволяет получать большую экономию металла при штамповке.

Ключевые слова: машиностроение; обработка металлов давлением; листовая штамповка; гибка.

The issue of determining of blank dimensions for obtaining of ring by stretching is considered. The method of obtaining of rings by stretching is patented and allows to receive great saving in metal during stamping.

Keywords: mechanical engineering; plastic metal work; sheet-metal stamping; bending.

В промышленности изготовляют большое количество кольцевых деталей, отличающихся разнообразием форм и размеров, условиями эксплуатации и производства, пластичностью и прочностью материала.

Часть кольцевых деталей изготовляют токарной обработкой заготовок, отрезанных из прутка или вырезанных из толстолистового материала. Такие технологические процессы характеризуются низким коэффициентом использования металла и большой трудоемкостью. В связи с этим проблемы снижения расхода металла на изготовление изделия, уменьшения технологических отходов в процессе металлообработки приобретают первостепенное значение. Они могут быть решены путем замены технологических процессов, основанных на резании металла, более экономичными методами формообразования деталей. Так, применение методов холодного деформирования взамен обработки резанием [1, 2] дает возможность повысить коэффициент использования металла и снизить трудоемкость изготовления деталей в массовом и крупносерийном производствах.

В работе [3] предложен новый метод получения колец из листовой заготовки, который позволяет получить существенную экономию металла. Однако отсутствие работ по анализу процесса деформирования при изготовлении кольца существенно сдерживает внедрение данного технологического процесса в производство.

Схема процесса показана на рис. 1.

В статье проведен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки в целях определения размеров заготовки, необходимой для получения кольца с заданными размерами.

Эскизы заготовки и получаемой из нее детали приведены на рис. 2.

Разбиваем заготовку на два участка – прямолинейный и радиусный. Для первого участка принимаем методику расчета заготовки В.П. Романовского.

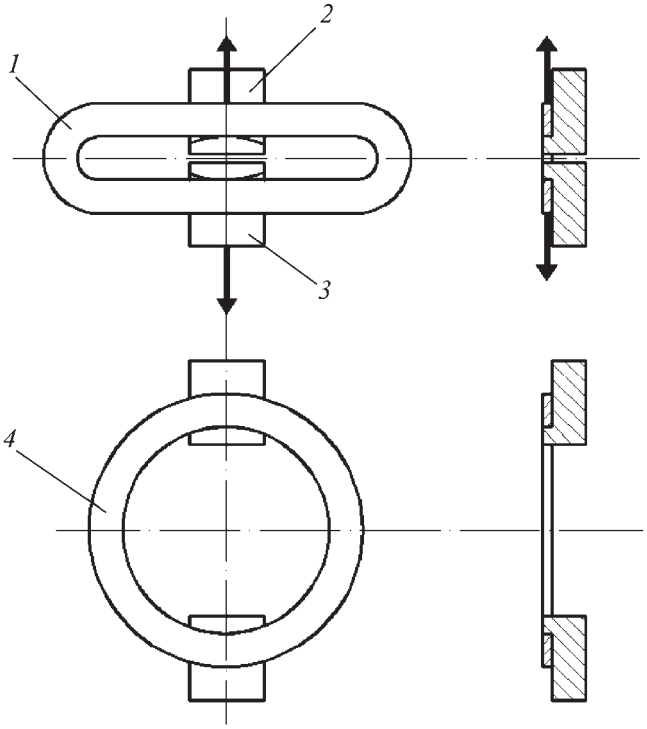


Рис. 1. Схема процесса изготовления детали типа кольца: *1* – заготовка; *2* – первый инструмент; *3* – второй инструмент; *4* – готовая деталь

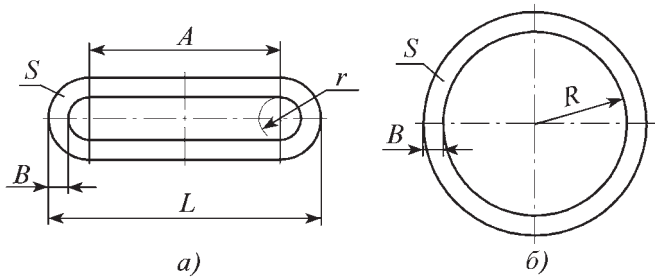


Рис. 2. Заготовка (*а*) и получаемая из нее деталь (*б*)

Если известны внутренний радиус детали R, ширина детали и заготовки B и внутренний радиус заготовки r, тогда

$$A = k\,\pi\,(R - r)\,, \qquad (1)$$

где k – коэффициент, учитывающий смещение нейтрального слоя заготовки; зависит от степени деформации R / B_0 и коэффициента утонения $\alpha = B / B_0$ (см. таблицу).

Коэффициент k в формуле (1) введен вследствие того, что площадь заготовки в плане меньше площади детали. Это обусловлено тем, что при разгибке заготовки на участках с радиусом r и гибке на прямолинейных участках нейтральный слой деформаций смещается в сторону сжатых волокон, происходит утонение материала и изменяется поперечное сечение. В результате заготовка немного удлиняется.

Коэффициент k был рассчитан экспериментально для узких заготовок из стали 08кп.

На втором участке размер заготовки определяется минимальным радиусом r.

Минимальный радиус гибки зависит от трех факторов:

1) разрушение или появление шейки в точке В;

2) появление складок в точке С;

3) разрушение, повышенный износ инструмента (пуансона).

Рассмотрим подробно каждый фактор.

Разрушение или появление шейки в точке В. Элемент заготовки до и после деформации показан на рис. 3.

В точке В реализуется линейная схема напряженного состояния – линейное растяжение, поэтому деформации не могут превышать предельную деформацию при растяжении δ_5.

Значения коэффициента *k*

R / B_0	$\alpha = B / B_0$	k
1,5	0,94	0,93
3	0,97	0,94
6	0,99	0,95
9	1	0,96
12	0,98	0,93
15	0,96	0,885

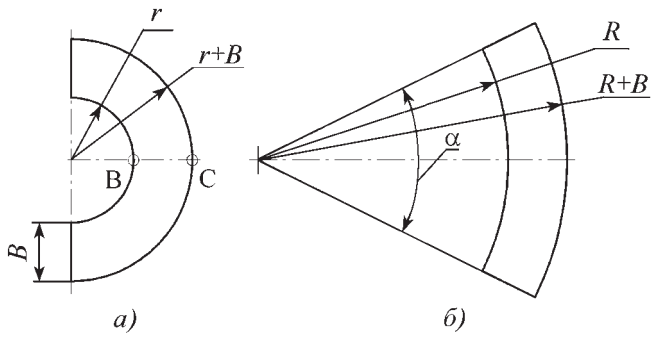


Рис. 3. Элемент заготовки до (*а*) и после (*б*) деформации

Отсюда

$$\alpha = \frac{\pi\,(2\,r + B)}{(2\,R + B)}\,. \qquad (2)$$

Учитывая, что длина дуги до L_0 и после L_k деформации равны соответственно:

$$L_0 = \pi\,r\,; \qquad L_k = \alpha\,R\,, \qquad (3)$$

получаем

$$\varepsilon = \frac{\alpha\,R - \pi r}{\pi r}\,. \qquad (4)$$

Подставив в (4) значение α из (2) и решив относительно минимального радиуса заготовки, имеем

$$r_{\min} = \frac{RB}{\delta_5\,(2\,R + B) + B}\,. \qquad (5)$$

Появление складок в точке С. В точке С реализуется линейная схема напряженного состояния – линейное сжатие, поэтому деформации не могут превышать предельную деформацию при сжатии ψ_5.

Учитывая, что длина наружной дуги до L_0 и после L_k деформации равны соответственно:

$$L_0 = \pi(r + B); \qquad L_k = \alpha(R + B)\,, \qquad (6)$$

получаем

$$\psi = \left| \frac{\alpha\,(R + B) - \pi\,(r + B)}{\pi\,(r + B)} \right|. \qquad (7)$$

Подставив в (7) значение α из (2) и решив относительно минимального радиуса заготовки, имеем

$$r_{\min} = \left| \frac{B\left(\dfrac{R + B}{2\,R + B} - 1 - \psi\right)}{\psi - \dfrac{2\,(R + B)}{2\,R + B} + 1} \right|. \qquad (8)$$

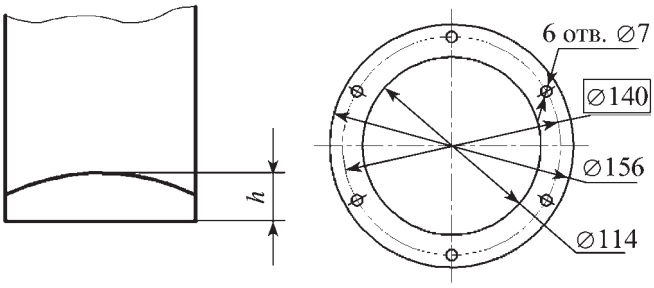


Рис. 4. Инструмент для растяжки

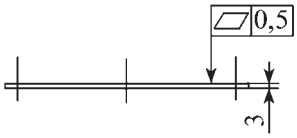


Рис. 5. Чертеж детали "фланец"

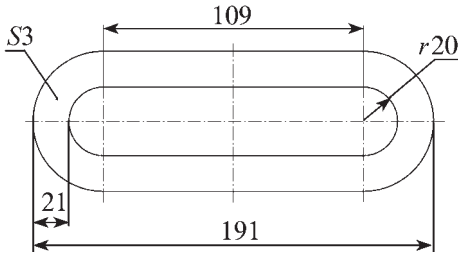


Рис. 6. Чертеж заготовки

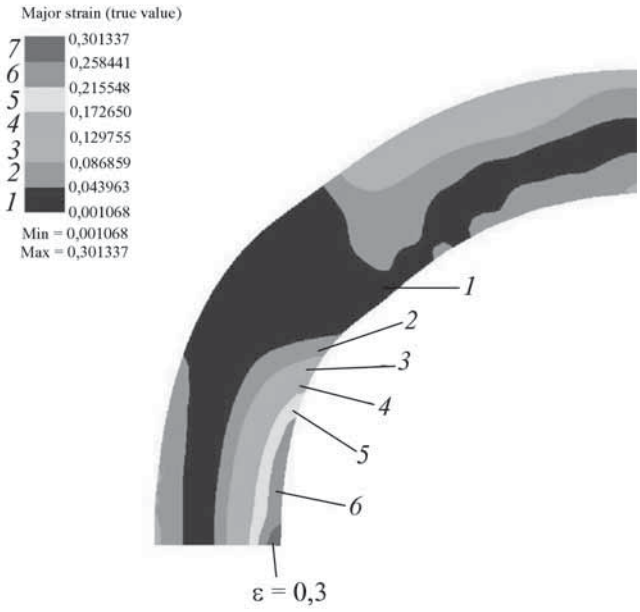


Рис. 7. Распределение интенсивности деформаций

Инструмент для растяжки должен быть рассчитан таким образом, чтобы его высота h (рис. 4) не превышала внутреннего радиуса заготовки r. Следовательно, минимальный радиус, при котором будет обеспечена стойкость инструмента, должен быть больше минимально допустимой высоты инструмента:

$$r_{\min} > h .$$

Исходя из опыта конструирования штампов, рекомендуется принимать высоту инструмента равной не меньше двух толщин материала во избежание среза во время растяжки:

$$h \geq 2S .$$

Таким образом, третий критерий имеет вид

$$r_{\min} > 2S .$$

Пример расчета заготовки (рис. 5). Расчет минимального радиуса заготовки:

по формуле (5): $r_{\min}$ =17,5 мм;

по формуле (8): $r_{\min}$ = 12,4 мм;

по критерию стойкости инструмента $r_{\min} > 2S$: $r_{\min}$ > 6 мм.

Радиус заготовки следует выбирать из условия $r \geq r_{\min}$. Принимаем радиус заготовки r = 20 мм.

Подставляя в формулу (1) значение принятого радиуса заготовки r и выбранного по таблице коэффициента k, имеем A = 109 мм.

Полученная заготовка показана на рис. 6.

Распределение интенсивности деформаций (моделирование в программном комплексе PAM-STAMP 2G) приведено на рис. 7.

Выводы

1. Полученные размеры заготовки показали удовлетворительное совпадение физического эксперимента с результатами моделирования.

2. Минимальный радиус заготовки рассчитан с точностью до 10 %. Например, деформации в точке B по PAM-STAMP составили 0,3, а по предложенной методике 0,27.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Валявкин Ф.М., Мозеров В.Г., Байбак И.А.** Комплексно-механизированный участок по производству кольцевых заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 3. С. 20–23.

2. **Артес А.Э., Кобзианидзе Д.Г.** Совершенствование технологических процессов холодной объемной штамповки деталей из трубных заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 10. С. 7–8.

3. **Патент** на полезную модель № 111785 от 27.12.2011.

Денис Владимирович Ростовцев;
Виктор Алексеевич Дёмин, д-р техн. наук,
demin@msiu.ru;
Евгений Иванович Семёнов, д-р техн. наук

УДК 621.983.31

А.А. Филатов, Е.В. Лагошина *(МГТУ им. Н.Э. Баумана),*
В.С. Зейдель, В.П. Середкин *(ООО "Строммаш", г. Москва)*

Изготовление заготовок втулок из листовой бериллиевой бронзы

Рассмотрен способ вытяжки изделий типа стакан без утонения стенки и применения прижима фланца из листовой бронзы марки БрБ2 толщиной 3 мм за три перехода. Рекомендован выбор необходимых диаметров и зазоров, приведены металлографические исследования материала полученных заготовок, предназначенных для изготовления подшипников скольжения.

Ключевые слова: бериллиевая бронза; стакан; подшипники скольжения; вытяжка без утонения; заготовка; металлографические исследования.

The method of drawing cup type product without thinning of the wall and the application of pressing flange from 3 mm thick sheet of bronze brand alloy 25 (BrB2) for 3 transitions is considered. Choice for the necessary diameters and clearances is recommended metallographic studies of obtained billet material intended for the production of plain bearings are given.

Keywords: beryllium bronze; cup; plain bearings; drawing without thinning; billet; metallographic studies.

С каждым годом возрастает спрос на высоколегированную бериллиевую бронзу в качестве материала для подшипников скольжения, которые применяют в атомной, химической (агрессивные среды), автомобильной, авиационной, нефтяной и других отраслях промышленности. Это связано с хорошей износостойкостью, антифрикционностью и коррозионной устойчивостью бериллиевой бронзы [1]. Использование подшипников качения в таких условиях работы, как правило, невозможно.

В качестве заготовок для таких подшипников скольжения применяют трубные заготовки из бериллиевой бронзы. Сортамент трубных заготовок, изготовляемых промышленностью, не всегда отвечает диапазону размеров требуемых подшипников. Также трубную заготовку для подшипников можно получить прессованием, но это дорогой метод и его использование связано с необходимостью разработки и изготовления пресс-формы.

Трубную заготовку можно получить путем механической обработки из поковки или круглой прокатанной заготовки. Данный способ применяют редко в связи с большими потерями материала в стружку (80...90 %) и трудоемкостью изготовления отверстия (сверлением). Возможно получение трубной заготовки литьем, однако при этом способе возможно образование недопустимых дефектов структуры (газовых раковин, трещин).

Экономически и технологически целесообразнее изготовление заготовок для подшипников скольжения из стаканчиков, получаемых вытяжкой из листовой бериллиевой бронзы без утонения стенок. При вытяжке без утонения диаметр заготовки на каждом переходе значительно изменяется и возможно образование складок. Поэтому вытяжку без утонения проводят двумя способами: без прижима и с прижимом заготовки. Данный способ изготовления втулок осуществляется за 4–5 переходов. В данной статье предложен способ изготовления втулок с использованием меньшего количества переходов.

Для повышения технологичности и уменьшения стоимости изготовления заготовок были опробованы различные варианты получения заготовок подшипников в виде стаканчиков вытяжкой из листовой бериллиевой бронзы. В результате было установлено, что повысить качество заготовок подшипников можно за счет наличия зазоров между матрицей и пуансоном во всех переходах.

В этом случае изготовление заготовки втулки подшипника можно осуществить за три перехода. В первом переходе (рис. 1, *а*) изготовляют профиль с наружным диаметром 1,46...1,56 диаметра готовой заготовки втулки и длиной 0,4...0,5 длины готовой заготовки втулки при наличии зазора между матрицей и пуансоном не менее 1,3 толщины листа.

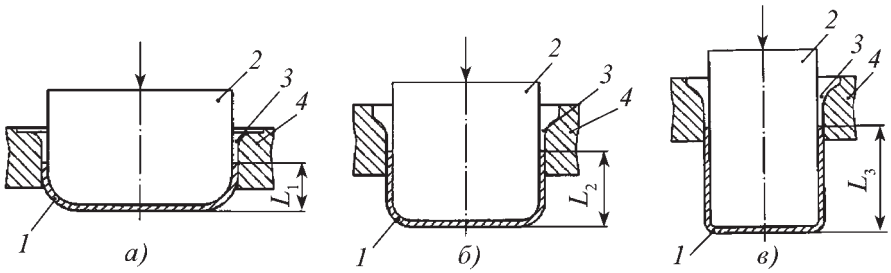


Рис. 1. Первый (*а*), второй (*б*) и третий (*в*) переходы вытяжки стаканчиков:
1 – заготовка втулки; *2* – пуансон; *3* – зазор между матрицей и пуансоном; *4* – матрица; L_1, L_2, L_3 – высота стакана

1. Химический состав материала стаканчиков, % мас.

Номер стаканчика	Cu	Be	Ni	Fe	Al	Si	Pb	Марка по составу
1	Основа	1,90	0,45	0,06	0,01	0,06	0,002	Соответствует марке бронзы БрБ2 по ГОСТ 18175–78
2		1,90	0,45	0,06	0,01	0,05	0,002	
–		1,8...2,1	0,2..0,5	<0,15	<0,15	<0,15	<0,005	Требования для бронзы БрБ2 по ГОСТ 18175–78

Во втором переходе (рис. 1, *б*) изготовляют профиль с наружным диаметром 1,2...1,34 диаметра готовой заготовки втулки и длиной 0,7...0,8 длины готовой заготовки втулки при наличии зазора между матрицей и пуансоном не менее 1,15 толщины листа.

В третьем калибрующем переходе (рис. 1, *в*) изготовляют втулку равномерной цилиндрической формы, при наличии зазора между матрицей и пуансоном в диапазоне 1,04...1,06 толщины листа. При этом толщина стенки готовой заготовки втулки равна толщине листового материала.

Изготовление заготовок втулок из листового материала осуществляли в универсальном штампе с установкой сменных матриц и пуансонов.

В качестве исходного материала использовали заготовку диаметром 120 мм из листа бериллиевой бронзы марки БрБ2 толщиной 3 мм.

Листы брали из двух партий. Всего было изготовлено 8 стаканчиков по 4 шт. из каждой партии. Для исследования были взяты по одному стаканчику (стаканчик № 1 и стаканчик № 2), изготовленному из каждой партии листов. Химический состав материала стаканчиков приведен в табл. 1.

2. Результаты металлографических исследований стаканчиков

Номер стаканчика, состояние материала	Сечение образца	Микроструктура	Твердость
Стаканчик № 1 в состоянии поставки (после закалки)	Продольное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и равномерно распределенной β-фазы. Обнаружены дефекты, идущие по направлению деформации металла, длиной до 0,65 мм	213...221 HV 17...19 HRC
	Поперечное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и равномерно распределенной β-фазы. Обнаружены дефекты длиной до 0,2 мм. Средний размер зерна: 6–7 балл	
Стаканчик № 1 (после закалки и старения)	Продольное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и мелких включений γ-фазы. Обнаружены дефекты, идущие по направлению деформации металла, длиной до 0,35 мм	386...407 HV 40...41 HRC
	Поперечное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и мелких включений γ-фазы. Обнаружены дефекты длиной до 0,15 мм. Средний размер зерна: 6–7 балл	
Стаканчик № 2 в состоянии поставки (после закалки)	Продольное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и равномерно распределенной β-фазы. Обнаружены дефекты, идущие по направлению деформации металла, длиной до 0,35 мм	225...241 HV 20...30 HRC
	Поперечное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и мелких включений γ-фазы. Обнаружены дефекты длиной до 0,15 мм. Средний размер зерна: 7–8 балл	
Стаканчик № 2 (после закалки и старения)	Продольное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и мелких включений γ-фазы. Обнаружены дефекты, идущие по направлению деформации металла, длиной до 0,25 мм	367...391 HV 38...40 HRC
	Поперечное	Микроструктура состоит из зерен α-фазы и мелких включений γ-фазы. Обнаружены дефекты длиной до 0,15 мм. Средний размер зерна: 7–8 балл	

Полученные данным способом образцы прошли металлографический анализ. Результаты металлографических исследований приведены в табл. 2.

На основании результатов исследований было установлено, что изготовленные по предложенной технологии подшипники скольжения из бериллиевой бронзы отвечают необходимым потребительским требованиям.

Таким образом, предлагаемый способ изготовления заготовок втулок из листового материала для получения подшипников скольжения из высоколегированной бериллиевой бронзы позволяет:

• упростить технологию и уменьшить трудоемкость изготовления;

• значительно сократить расход материала: от 80...90 % до 10...30 %;

• получить заготовку втулки равномерной цилиндрической формы и толщины стенки с минимальными припусками для механической обработки;

• получить заготовки втулок для подшипников скольжения в широком диапазоне размеров;

• обеспечить изготовление малых партий;

• снизить себестоимость изготовления заготовок втулок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Применение** бериллиевой бронзы в качестве материала опор скольжения / Д.В. Гречихин, О.В. Толмачев, С.Д. Топольняк, А.И. Хаймович // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 6.

Александр Андреевич Филатов, д-р техн. наук;
Елена Владимировна Лагошина,
elena19881988@mail.ru;
Владимир Сергеевич Зейдель;
Владимир Павлович Середкин

УДК 621.7

М.М. Петрушина, С.А. Евсюков *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Разработка технологического процесса штамповки профильных колец с двойными стенками методом совмещения вытяжки и отбортовки

Исследована деталь – кольцо с двойными стенками, наружная стенка которого получена вытяжкой, а внутренняя стенка – отбортовкой. Процесс вытяжки–отбортовки позволяет получать профильные кольца различных диаметров и толщин за один переход с минимальным отходом металла.

Ключевые слова: вытяжка; отбортовка; математическое моделирование.

The ring with double walls, which contains outer wall obtained by deep drawing and inner wall obtained by hole–flanging, is studied. Combined process of drawing and flanging allows manufacturing profile rings of various diameters and thicknesses for one stage with minimal waste of metal.

Keywords: deep drawing; hole flanging; simulation.

В современной технике существует класс деталей, имеющих форму колец с двойными стенками, или U-образной образующей. К ним относятся, например, профильные кольца воздухоочистительных аппаратов, в состав каждого из которых входит 29 профильных колец разных диаметров (рис. 1). Наружный диаметр D колец составляет 62...230 мм, внутренний диаметр d = 32...200 мм.

Традиционный способ изготовления профильных колец методами обработки резанием характеризуется большим отходом металла, дальнейшее использование которого затруднительно. Значительной экономии металла при их изготовлении можно добиться за счет применения листового металла, преобразованного посредством операций листовой штамповки. Одновременно с экономией материала может быть снижена и трудоемкость.

Существует несколько возможных вариантов изготовления профильных колец методами листовой штамповки (рис. 2).

По первому варианту (см. рис. 2, *а*) выполняют листовую штамповку из кольцевой заготовки совмещением операций вытяжки и отбортовки. Наружный стакан детали получают вытяжкой, а внутреннюю

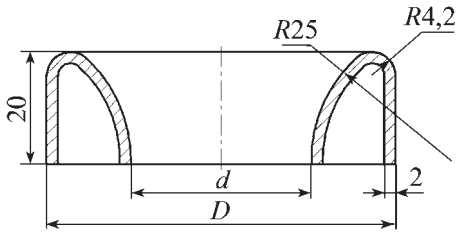


Рис. 1. Чертеж кольца

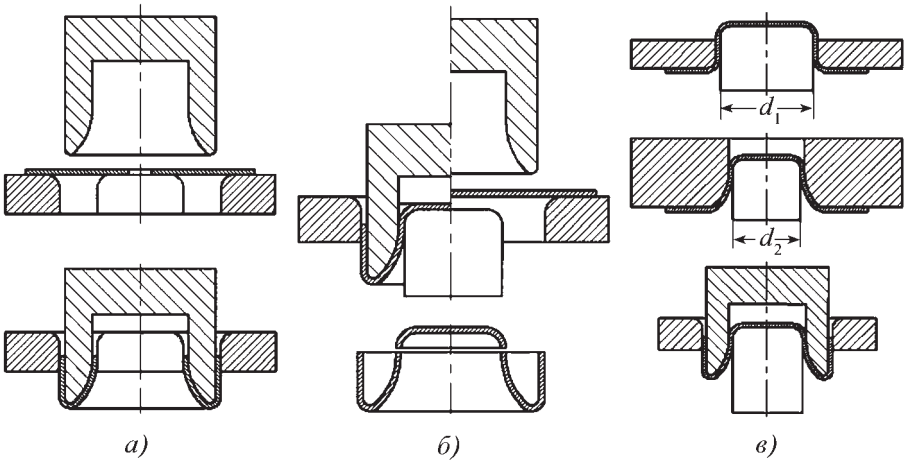


Рис. 2. Варианты технологических процессов штамповки колец:
а – вытяжка–отбортовка; *б* – комбинированная вытяжка; *в* – трехпереходная вытяжка

(профильную) стенку – отбортовкой. Этот вариант является оптимальным, так как готовую деталь штампуют за один ход пресса и применяют всего один штамп. После штамповки необходима обработка резанием детали по торцу.

По второму варианту (см. рис. 2, *б*) деталь штампуют из круглой заготовки, используя операцию комбинированной вытяжки наружного и внутреннего стаканов. Штамповку выполняют за один ход пресса и применяют один штамп. После штамповки необходима торцовка наружного стакана и отрезка донышка внутреннего стакана. Донышко можно использовать как заготовку для других деталей. Недостатком этого варианта является перетяжка металла заготовки через пуансон малого радиуса (2,2 мм), что может привести к разрушению заготовки.

Третий вариант (см. рис. 2, *в*) – штамповка из круглой заготовки двух- или трехпереходной вытяжкой. Этот вариант устраняет отмеченный выше недостаток комбинированной вытяжки, так как перетяжка металла из наружного стакана во внутренний отсутствует. Однако по этому варианту требуются два или три штампа (по результатам расчетов), а после штамповки – торцовка и отрезка донышка.

Очевидно, что наиболее экономичен вариант штамповки методом совмещения вытяжки–отбортовки, но необходимо уточнить диапазон использования данного варианта и проверить возможность штамповки колец данным способом, удовлетворяющих всем эксплуатационным требованиям.

Рассматривая номенклатуру профильных колец воздухоочистительного аппарата, рассчитаем по соответствующим зависимостям [1] коэффициенты вытяжки и отбортовки и напряжения при вытяжке наружного стакана и сравним их с допускаемыми показателями, указанными в справочной литературе [2].

В результате сравнения получили, что по коэффициентам отбортовки детали с наименьшими диаметрами оказываются за границей допускаемых значений. Несколько типоразмеров определяются неоднозначно в связи с различными допускаемыми коэффициентами, указанными в разных источниках, и требуют проверки теоретических данных методами моделирования или эксперимента (рис. 3). По коэффициентам вытяжки и расчетным напряжениям при вытяжке все типоразмеры колец номенклатуры воздухоочистительного аппарата находятся в пределах допускаемых значений (рис. 4, 5).

Для проверки возможности штамповки профильных колец совмещенным процессом вытяжки–отбортовки и определения границ применимости процесса проведено моделирование в специализированной программе для листовой штамповки AutoForm. Расчет в программе ведется методом конечных элементов, которые представляют собой мембраны. Программа дает возможность наблюдать в любой момент времени процесс штамповки и такие его параметры, как технологическая сила, толщина материала, деформации, контактные напряжения, тензор напряжений и деформаций,

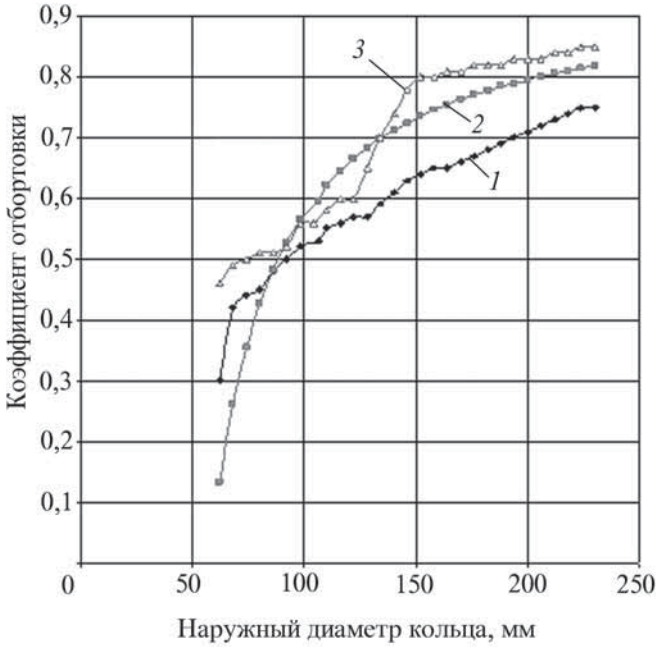


Рис. 3. Коэффициенты отбортовки наружного стакана:
1, *3* – предельные по В.П. Романовскому и НИИавтопром соответственно; *2* – фактические

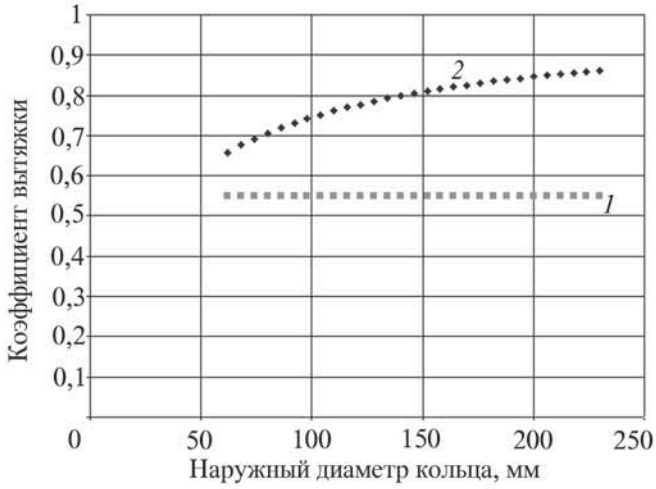


Рис. 4. Коэффициенты вытяжки наружного стакана:
1 – предельные (коэффициент вытяжки $m_в$ = 0,55); *2* – фактические ($m_в = \frac{D_ц}{D_з}$, где $D_ц$, $D_з$ – диаметр полученного цилиндра и заготовки соответственно)

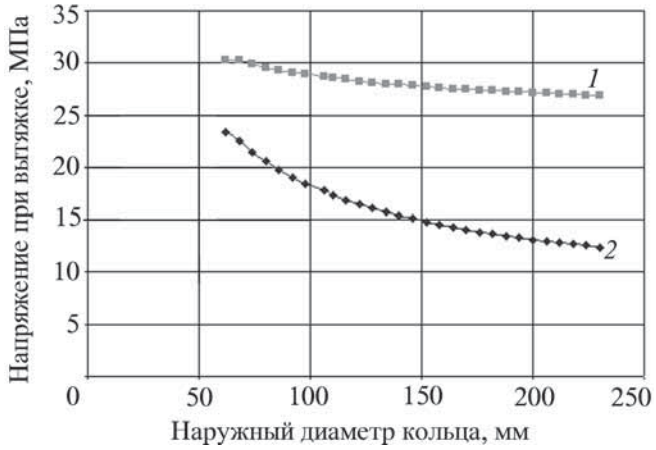


Рис. 5. Напряжения при вытяжке наружного стакана:
1 – допускаемые; *2* – максимальные

с ее помощью можно определить, где возможно появление складок и разрывов.

При построении модели в AutoForm инструменты приняты абсолютно жесткими, трение постоянно по всей поверхности детали, коэффициент трения принят равным 0,1, скорость деформирования постоянна.

Инструменты для модели построены с помощью программы SolidWorks.

В воздухоочистительном аппарате кольца изготовлены из стали 08кп, толщина заготовки принята 2 мм. Аналог стали 08кп в библиотеке AutoForm – сталь SPCE.

Проведя моделирование для нескольких типоразмеров колец, получили, что кольца меньше типоразмера с наружным диаметром 104 мм и внутренним диаметром 74 мм не могут быть изготовлены методом

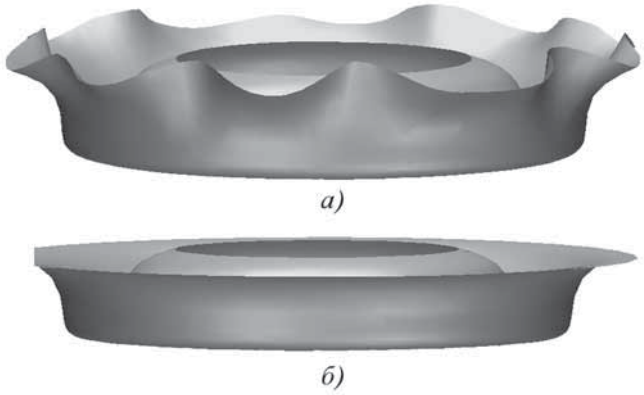


Рис. 6. Промежуточная стадия деформирования детали толщиной 2 мм:
а – без использования складкодержателя; *б* – с использованием складкодержателя

совмещения вытяжки и отбортовки. Ограничивающим фактором в данном случае является разрушение заготовки по краю борта, вызванное большими растягивающими напряжениями при отбортовке.

Таким образом, для номенклатуры профильных колец воздухоочистительного аппарата метод совмещения вытяжки и отбортовки можно использовать в пределах от кольца с наружным диаметром 104 мм и внутренним диаметром 74 мм до самого большого кольца в номенклатуре с наружным диаметром 230 мм и внутренним диаметром 200 мм. Для остальных типоразмеров необходимо применять другой технологический процесс. Для указанных типоразмеров, изготовляемых вытяжкой–отбортовкой, необходимо выявить закономерности течения процесса с помощью моделирования.

При моделировании детали граничного типоразмера с толщиной листа 2 мм очевидным результатом моделирования является необходимость использования складкодержателя. В промежуточной стадии деформирования видны выраженные складки без использования складкодержателя (рис. 6, *а*) и отсутствуют складки с использованием складкодержателя (рис. 6, *б*).

К концу деформирования складки не имеют выраженный характер, но на стенках детали остаются следы от гофр. Это подтверждается экспериментом, который был проведен для детали рассматриваемого типоразмера с толщиной листа 2 мм. Результаты эксперимента представлены на рис. 7.

Высота всех полученных в ходе эксперимента деталей соответствует требуемым 20 мм с учетом припуска на обрезку величиной 2 мм.

Утолщение наружной стенки (по краю) незначительно – в пределах 0,1 мм, что составляет не более 5 % толщины исходного листа. По результатам моделирования максимальное утолщение наружной стенки со складкодержателем 0,27 мм (13,5 %), без складкодержателя 0,47 мм (23,6 %).

Рис. 7. Детали, полученные вытяжкой–отбортовкой:
а – без использования складкодержателя; *б* – с использованием складкодержателя

Утонение внутренней стенки (по краю) составило 0,4...0,6 мм или 20...30 % толщины исходного листа. По результатам моделирования утонение внутренней стенки 0,6 мм (30 %).

Таким образом, эксперимент показал, что с помощью совмещенного процесса вытяжки и отбортовки возможно получение кольца заданного типоразмера с удовлетворительной точностью изготовления. "Перетяжка" стенок, вызываемая возможной нестабильностью совмещенного процесса, не наблюдается. При изготовлении колец с использованием складкодержателя полученные детали удовлетворяют эксплуатационным требованиям.

В машиностроении могут применяться детали подобной формы с различной толщиной листа. Проведено моделирование для разных толщин листа без складкодержателя для изучения влияния толщины листа на поведение материала. По результатам моделирования проведены сравнение внешней формы получаемой детали на промежуточных стадиях и в конце деформирования и сопоставление для различных толщин некоторых численных параметров процесса.

Следует отметить, что с увеличением толщины детали изменяется форма складок, и в конечной детали с наибольшей из рассматриваемых толщин следы от гофр отсутствуют. Это соответствует условию Л.А. Шофмана для первого перехода вытяжки, при котором вытяжка без складок происходит при выполнении неравенства $D - d \leq (18...22)\,s$, где s – толщина детали [2]. Таким образом, более выигрышными являются процессы вытяжки с наибольшей относительной толщиной детали s/D.

При моделировании относительную толщину детали изменяли от 0,007 до 0,025.

В зоне отбортовки (внутренняя стенка детали) также с изменением толщины заготовки меняется распределение зон формообразования. С увеличением толщины заготовки зона наибольшей опасности с точки зрения образования трещин становится меньше, а при наибольших значениях толщин отсутствует. Следовательно, увеличение толщины заготовки при прочих равных условиях способствует наиболее безопасному течению процесса отбортовки.

Одним из важных критериев процесса получения профильных колец является повторение контуром детали контура пуансона. Моделирование показало, что независимо от толщины заготовки контур детали точно повторяет контур пуансона (рис. 8).

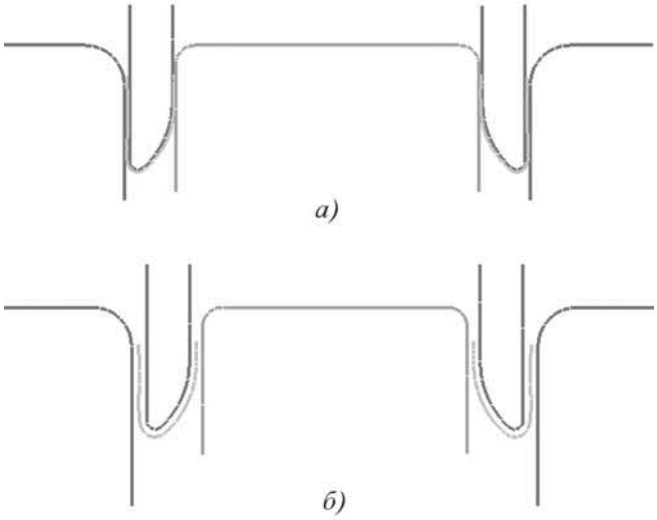


Рис. 8. Повторение контуром детали контура пуансона:
а – для относительной толщины s/D = 0,007; *б* – для s/D = 0,021

Выводы

1. Процесс вытяжки–отбортовки является наиболее экономичным и наименее трудоемким процессом получения профильных колец воздухоочистительного аппарата. Моделирование процесса и экспериментальная проверка подтвердили, что полученные кольца удовлетворяют эксплуатационным требованиям к профильным кольцам.

2. Увеличение толщины заготовки при прочих равных условиях способствует более безопасному течению процесса отбортовки.

3. Независимо от толщины заготовки контур детали с достаточной степенью точности повторяет контур пуансона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н.** Технология и автоматизация листовой штамповки: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 480 с.

2. **Романовский В.П.** Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.

Марина Михайловна Петрушина;
Сергей Александрович Евсюков, д-р техн. наук,
mt6ews@yandex.ru

УДК 621.7.04

А.М. Горленко, А.Г. Пашкевич*, С.А. Осипов, В.В. Мироненко (*Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет,*
** Московский авиационный технологический университет им. К.Э. Циолковского)*

Пневмотермическая формовка тонкостенных деталей из трубных заготовок

Приведены результаты опытных работ по штамповке тонкостенных деталей из трубных заготовок в режиме сверхпластичности с изготовлением модельных деталей типа оболочек, сварных обечаек и деталей сложной формы "кожух". Показано, что применение сверхпластичности повышает эффективность производства и открывает возможности создания перспективных конструкций, более полно отвечающих возрастающим требованиям к массе, прочности и надежности.

Ключевые слова: пневмотермическая формовка трубных заготовок; эффект сверхпластичности; температурно-скоростные условия деформации.

Results of development works on punching of thin-walled details from round billets in regime of superplasticity the circuit design with manufacturing of modelling details of type of shells, welded shells and details of the difficult form of type "casing" are resulted. It shown that application of superplasticity raises production efficiency, but also opens ample opportunities of creation of perspective designs, in fuller extent meeting increasing demands to weight, strength and reliability.

Keywords: pneumatic and thermal molding of round billets; superplasticity effect; temperature and speed conditions of deformation.

Пневмотермическая формовка (ПТФ) деталей из трубных заготовок (рис. 1) предполагает герметизацию внутренней полости заготовки, ее нагрев до температуры проявления штампуемым сплавом эффекта сверхпластичности, формоизменение заготовки по профилю инструмента избыточным давлением газа и удаление отштампованной детали из инструмента (разъемной матрицы).

Наиболее простым способом герметизации является сварка трубы с заглушками, одна из которых имеет штуцер для подключения к системе подачи газа (воздуха, аргона, азота). Возможна также герметизация трубы заглушками с применением специальных устройств механического либо гидравлического типа.

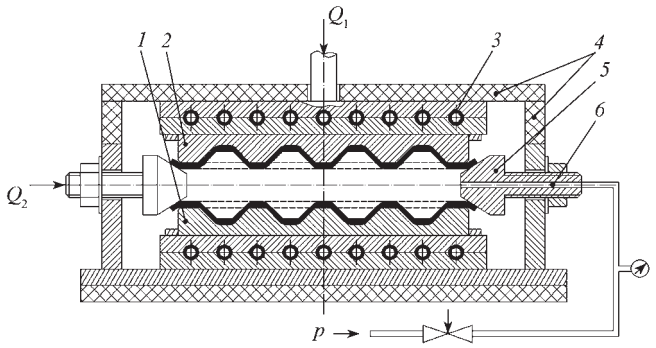


Рис. 1. Схема экспериментального блока ПТФ трубных заготовок:
1, *2* – полуматрицы; *3* – нагреватель; *4* – теплоизоляция; *5* – система герметизации; *6* – система избыточного давления

Нагрев заготовки осуществляется от горячего инструмента, нагреваемого спиралями, ТЭНами, селитовыми, корундовыми стержнями либо индукторами. Температурный режим выдерживается системой контроля и регулирования температур.

Деталь формуют по профилю инструмента давлением газа, подаваемого в герметичную полость трубной заготовки. Важной предпосылкой качественного выполнения процесса является обеспечение оптимальных скоростных условий деформации, что требует управления давлением по ходу процесса. Расчет кривых нагружения "давление–время" проводится на основе принципа поддержания контролируемой скорости деформации в зоне заготовки, получающей максимальную степень деформации.

При удалении отформованной детали из технологической оснастки для предотвращения случайных деформаций рекомендуется предварительно охлаждать деталь распыленной жидкостью либо воздухом. По технике безопасности предпочтительнее охлаждение детали воздухом от системы избыточного давления.

Следует отметить, что хотя работы по удалению изделия из технологической оснастки второстепенны, их влияние на качество получаемого изделия значительно. Удаление деталей сложной формы трудоемко из-за опасности поводок и местных повреждений.

Экспериментальные работы свидетельствуют о существенном расширении возможностей формовки при выходе на оптимальные режимы сверхпластической деформации. Так, например, при свободной формовке труб ∅30×1,0 мм из сплава АМг6 достигнуто увеличение диаметра более чем в 2 раза (рис. 2).

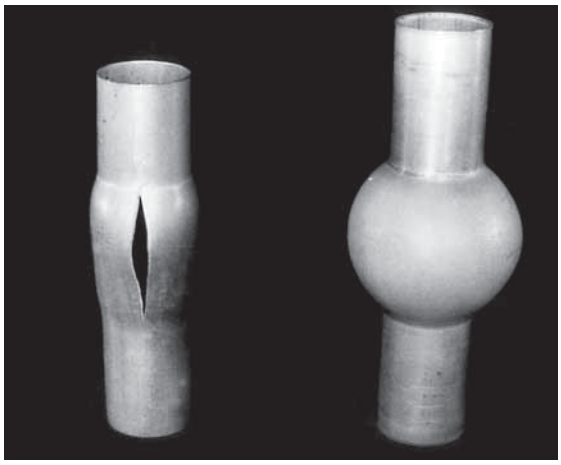


Рис. 2. Формовка–раздача трубных заготовок:
а – формовка резиной; *б* – пневмотермическая формовка (температура формовки $t_ф$ = 420 °С; скорость деформации $\dot{\varepsilon}$= 4,5·10^{-3} с$^{-1}$)

При традиционной штамповке резиной увеличение диаметра трубы не превышает 15...18 %.

Удовлетворительные результаты получены при сверхпластической формовке труб из других промышленных сплавов (МА8, ОТ4, ВТ1-0). Влияние температурно-скоростных условий деформации на возможности формоизменения аналогично их влиянию на относительное удлинение при испытаниях на одноосное растяжение.

Сверхпластическую формовку трубных заготовок можно успешно применять при изготовлении разнообразных деталей типа оболочек.

На рис. 3 показаны образцы модельных оболочек с продольными и поперечными элементами жесткости, отформованные в состоянии сверхпластичности. В качестве исходных заготовок использованы отрезки

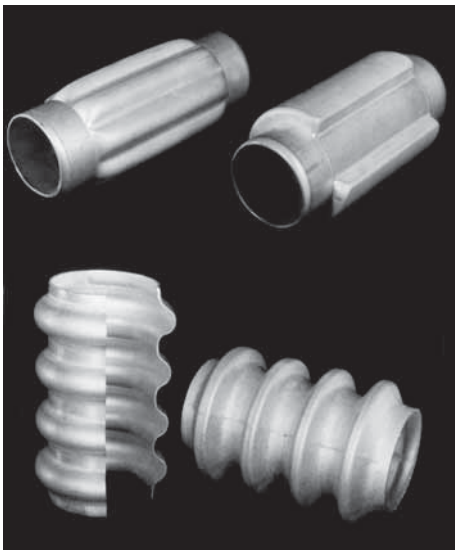


Рис. 3. Образцы модельных оболочек, отформованные в состоянии сверхпластичности (труба ∅50×1,5 мм, сплав АМг6)

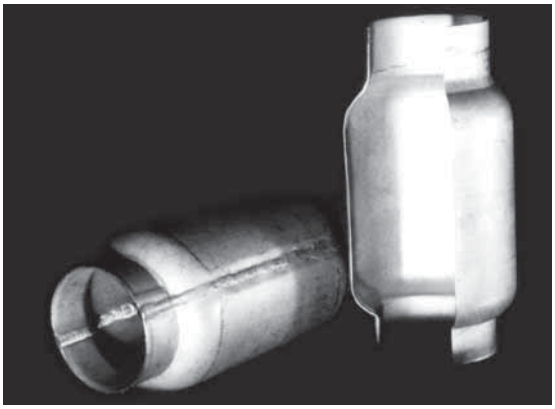


Рис. 4. Опытные образцы, отформованные из сварных обечаек (сплав АМг6, лист толщиной 1,5 мм)

труб ∅50×1,5 мм из сплава АМг6. Температура формовки $t_ф$ = 400...420 °С; максимальное давление формовки $p_ф$ = 0,8...1,0 МПа; время формовки $\tau_ф$ = 300...360 с.

Сверхпластическую формовку можно применять не только для труб, но и для сварных обечаек (рис. 4). При проведении опытных работ отмечено значительное влияние сварного шва на возможности формоизменения. Последнее особенно относится к титановым сплавам. Увеличение размеров зерна в шве и околошовной зоне практически исключает их из процесса формообразования изделия. Толщина оболочки в зоне сварки близка к исходной. Этот эффект можно использовать для компенсации ослабления металла сваркой.

Формовка сварных обечаек внедрена в конкретных условиях производства при изготовлении крупногабаритных оболочек размером 400×600 мм. Оболочки имеют бочкообразную форму с двумя рифтами, материал – АМг6, лист толщиной 1,5 мм.

Получены оболочки требуемой формы. Контур наружной поверхности полностью соответствует форме инструмента. Пружинения и искажения формы после ПТФ не наблюдается. При металлографических исследованиях грубых нарушений исходной структуры и значительного роста зерна в различных зонах оболочки не обнаружено. Механические свойства сплава после сверхпластической деформации незначительно отличаются от исходных.

Освоение прогрессивной технологии обеспечило:

1. Повышение прочности и герметичности изделия в результате сокращения протяженности сварных швов и повышения качества сварки при переводе ее на автоматическую.

2. Повышение экономической эффективности производства за счет уменьшения объема слесарно-доводочных работ и сокращения процента брака.

Положительные результаты достигнуты при отработке процесса ПТФ крупногабаритных обтекателей из труднодеформируемого сплава ВТ20. Обтекатели оживальной формы получены из конических обечаек,

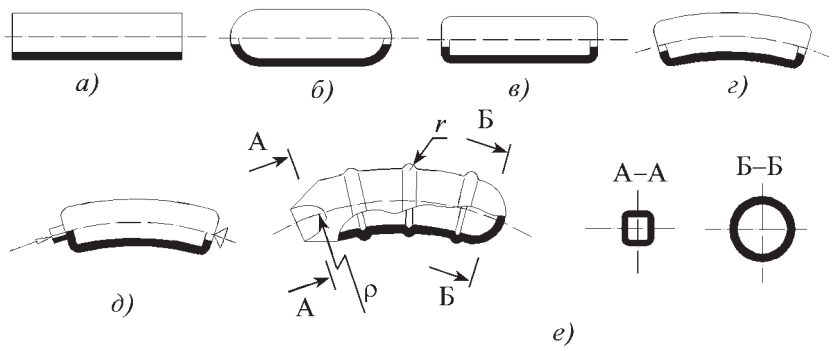


Рис. 5. Технологическая схема изготовления детали сложной формы типа "кожух" из трубной заготовки:
а – исходная заготовка; *б* – обжим; *в* – осадка; *г* – гибка; *д* – сварочные операции; *е* – пневмотермическая формовка

сваренных автоматической аргонодуговой электросваркой из нескольких листовых заготовок толщиной 1,5 мм. После сварки швы подвергали отжигу для снятия остаточных напряжений. Вместо отжига целесообразно применять прокатку сварных швов. Формовку оболочек проводили аргоном (p_{max} = 1,0 МПа) при температуре 800...840 °С.

Получены оболочки с требуемой точностью контуров обводов и высоким качеством внешней поверхности. Решена задача обеспечения требуемой точности контуров стыков с сопрягаемыми элементами конструкции.

На рис. 5 приведена технологическая схема изготовления детали сложной формы "кожух". Максимальный диаметр детали 110 мм, длина 325 мм. Деталь имеет кривизну в продольном направлении (ρ = 250 мм), три поперечных рифта (r = 6 мм) и зону перехода круглого сечения в квадратное. В качестве исходной использована труба ∅90×2,0 мм из сплава АМг6.

Процесс изготовления кожуха включает в себя обжим и осадку концов трубной заготовки (см. рис. 5, *б*, *в*), гибку заготовки на требуемый радиус (см. рис. 5, *г*), заварку торца с одной стороны и варку штуцера с другой (см. рис. 5, *д*), пневмотермическую формовку (см. рис. 5, *е*).

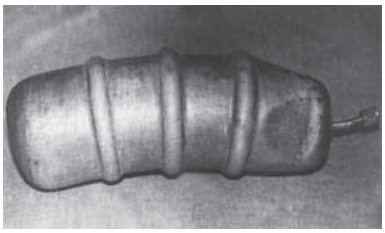


Рис. 6. Деталь сложной формы "кожух", отформованная из трубной заготовки ∅90×2,0 мм (сплав АМг6)

Формовку проводили в блоке ПТФ, состоящем из двух полуматриц с горизонтальным разъемом. Полуматрицы изготовлены из сплава АК5М (АЛ5). Блок с заготовкой устанавливали в муфельную печь, нагревали до 420 °С и формовали деталь воздухом (p_{max} = 2,0 МПа) с выдержкой $\tau_ф$ = 20...30 мин.

Отформованная деталь сложной формы "кожух" показана на рис. 6.

Заключение. Пневмотермическая формовка трубных заготовок обеспечивает широкие возможности изготовления тонкостенных деталей различной формы и различного назначения с высокой точностью воспроизведения конструктивных контуров.

Александр Михайлович Горленко, канд. техн. наук, gam@istu.edu;
Анатолий Георгиевич Пашкевич, канд. техн. наук;
Сергей Александрович Осипов;
Владимир Витальевич Мироненко

УДК 621.73

Г.Н. Кулик *(ОАО "Дефорт", г. Санкт-Петербург)*

Исследование процесса прошивки

Получены зависимости, описывающие формоизменение заготовки при двухсторонней прошивке, и приведены примеры возможного их использования.

Ключевые слова: прошивка; заготовка; рототабельный план.

The dependences describing the blank deformation during the double-sides drifting are obtained and examples of their possible using are given.

Keywords: drifting; blank; roto-basic plan.

Введение. При изготовлении поковок с осевым отверстием основной операцией является прошивка – открытая или закрытая. Для получения толстостенных заготовок применяют открытую прошивку, а тонкостенных – закрытую.

В экономическом отношении более предпочтительна открытая прошивка (меньшая сила и стоимость инструмента). Однако при открытой прошивке происходит искажение формы и размеров поковок, которое тем больше, чем меньше отношение диаметра

исходной заготовки к диаметру прошивного пуансона и чем больше отношение высоты исходной заготовки к толщине перемычки, удаляемой при прошивке.

Величину допустимого при прошивке искажения формы заготовки определяют возможностями перераспределения металла при раскатке на оправке под молотом или прессом либо прокатке на кольцераскатном стане. Границу применения открытой прошивки необходимо определять исходя из допустимой величины искажения формы заготовки.

Анализ литературных данных показал, что в настоящее время существуют две методики расчета формоизменения заготовок при открытой прошивке. В первой методике используют формулу Цшейле, построенную на экспериментальных данных (Семенов Е.И. Ковка и объемная штамповка. М.: Высшая школа, 1972.). Они получены при прошивке заготовки цилиндрическим пуансоном без учета предварительной наметки, контактного трения и радиуса пуансона.

По данной методике наибольший диаметр прошитого кольца $D_{\max}$ определяют по формуле

$$D_{\max} = 1{,}13\,\{(1{,}5 / H)[V + f(H - h)] - 0{,}5\,F_0\}^{0,5},$$

где $f = \pi d^2 / 4$ – площадь поперечного сечения пуансона; d – диаметр пуансона; $V = (\pi D_0^2 / 4) H_0$ – объем исходной заготовки; D_0 и H_0 – диаметр и высота исходной заготовки; H – высота заготовки после прошивки; h – высота выдры; $F_0 = \pi D_0^2 / 4$ – площадь поперечного сечения исходной заготовки.

Вторая методика основана на использовании теоретического решения задачи об открытой прошивке осесимметричных заготовок цилиндрическим пуансоном в интервале значений отношения d/D_0 от 0,2 до 0,5 (Тарновский И.Я. и др. Теория обработки металлов давлением. 1962.) со следующими допущениями:

1) $1/3 \ldots 1/4 \le h / H_0 \le 1$;

2) верхний наружный диаметр заготовки в результате прошивки не изменяется;

3) на поверхности контакта с нижней плитой кольцевой части заготовки с внутренним диаметром, равным диаметру прошивного пуансона, силы трения отсутствуют;

4) трение о боковую поверхность пуансона отсутствует.

Используя указанные методики, невозможно определить степень искажения формы заготовки, так как по ним рассчитывают максимальные и средние размеры заготовок, без относительно на какой высоте эти размеры находятся. Поэтому определить распределение объемов металла по высоте затруднительно.

Одним из методов перераспределения объемов металла по высоте поковки является двухсторонняя прошивка с использованием пуансонов различной высоты. Данный процесс применяют в промышленности, например на прессе силой 40 МН в комплексе оборудования кольцераскатного стана фирмы "Тиссен". В настоящее время в технической литературе сведения о поведении металла при реализации данного процесса отсутствуют.

Также этот процесс может быть интересен при изготовлении деталей, заготовками которым служат ступенчатые патрубки (а. с. 958026, 948513, 946763, 963662) и профильные кольца, получаемые на кольцераскатном стане, имеющие элементы, располагаемые по его высоте с различными площадями поперечного сечения. В указанных источниках литературы ступенчатые патрубки предложено получать протяжкой на дорне в вырезных бойках, в данной работе сделана попытка изготовления колец, пригодных для получения ступенчатых патрубков путем раскатки, а также переходов непосредственно из прошитой заготовки, без операции протяжки.

Существует способ прошивки, когда не происходит искажения формы заготовки. Он реализуется следующим образом: "В качестве исходного использовали слиток из стали 45 массой 39 т. Слиток нагрели в печи до температуры 1240 °С, обжали прибыль на диаметр 1020 мм и биллетировали на диаметр 1290 мм, затем вырубили два блока длиной по 1600 мм каждый. После второго нагрева блок осадили до высоты 1400 мм, поместили на кантовальную яму с теплоизоляцией одного из торцов и охлаждали в течение 2 ч. После охлаждения заготовку установили на подкладную плиту, прошили полым прошивнем диаметром 550/270 мм. Второй блок прошивали без подстуживания поверхности. Сравнительный анализ качества прошитых блоков показал более высокое качество отверстия по соосности и наличию выходных дефектов блока, прошитого после охлаждения поверхности (Кобелев О.А. Разработка эффективных ресурсосберегающих технологий производства крупногабаритных моноблочных плит и изделий из них: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010.).

Учитывая мелкосерийный и индивидуальный характер производства кольцевых изделий в кузнечных цехах машиностроения, углубленное изучение процесса открытой прошивки является особо актуальным.

Цель работы – изучение поведения металла при двухсторонней прошивке и разработка расчетных зависимостей формоизменения поковок в зависимости от конструкции инструмента и размеров исходной заготовки.

Методика работы. Экспериментальная установка состоит из испытательной машины фирмы Schenk силой 2,5 МН и закрепленного в ее захватах рабочего инструмента. В качестве материала испытуемых заготовок, на которых моделировали процесс прошивки, использовали свинец. Процесс прошивки проходил в две стадии: вначале заготовка деформировалась между нижним прошивнем и верхней плоской плитой, и после завершения процесса внедрения прошивня в тело заготовки плоская плита убиралась и дальнейшая деформация осуществлялась верхним прошивнем.

Исследование проведено по рототабельному плану (табл. 1 и 2) с варьированием следующих параметров: $x_1 = D_0 / d$; $x_2 = H_0 / d$; $x_3 = h_1 / d$; $x_4 = h / d$; $x_5 = r / d$ (где h_1 – высота пуансона предварительной прошив-

1. Область изменения параметров прошивки и ее разбиение на уровни

Исследуемые параметры	Уровни		
	Нижний	Нулевой	Верхний
	–1	0	+1
D_0/d	1,25	1,5	1,75
H_0/d	2,0	2,5	3,0
h/d	0,08	0,1	0,12
h_1/d	0,08	0,12	0,16
r/d	0,033	0,067	0,1

ки; r – радиус закругления пуансона) при постоянном трении.

Тогда нормированные параметры равны:

$$X_1 = \frac{x_1 - 1{,}5}{0{,}25}; \quad X_2 = \frac{x_2 - 2{,}5}{0{,}5};$$

$$X_3 = \frac{x_3 - 0{,}1}{0{,}02}; \quad X_4 = \frac{x_4 - 0{,}12}{0{,}04}; \quad X_5 = \frac{x_5 - 0{,}065}{0{,}035}.$$

В ходе эксперимента перемещение рабочего инструмента и развиваемую машиной силу регистрировали ее контролирующими приборами, а также проводили запись диаграммы "сила–перемещение". Скорость движения пуансона приняли постоянной и равной 3,5 мм/с. Конусность пуансона 5°. Заготовки относительно пуансона центрировали визуально. Схема замера прошитой заготовки представлена на рис. 1, измерения проводили штангенинструментом.

Проведение исследования. Вид одной из поковок, полученной в ходе эксперимента, показан на рис. 2, а значения параметров обмера поковок сведены в табл. 3. Из их анализа следует, что параметры в однотипных точках, но с различными радиусами закругления пуансона, практически совпадают. Также необходимо отметить, что процесс реализовывался не по жесткой схеме остановки плунжера в нижнем положении, эти значения очень близки между собой, но и параметры, полученные при значениях, выходящих за рамки основного массива данных, также недалеки от остальных значений.

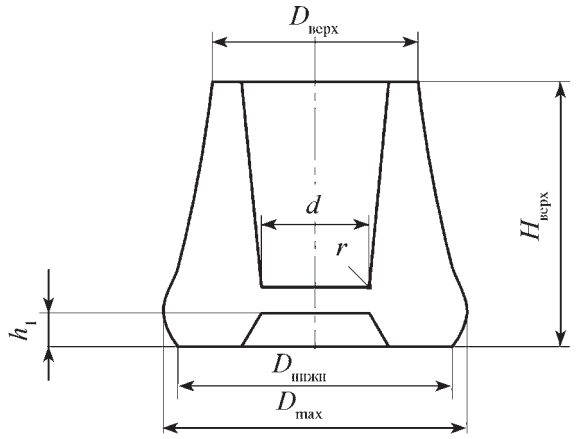


Рис. 1. Схема измерений прошитой заготовки

2. Рототабельный план полного факторного эксперимента

№ п/п	D_0/d	H_0/d	h/d	h_1/d	r/d
1	+	+	+	+	+
2	+	–	+	–	+
3	–	–	+	+	+
4	–	+	+	–	+
5	+	+	–	–	+
6	+	–	–	+	+
7	–	–	–	–	+
8	–	+	–	+	+
9	–	+	+	+	+
10	+	–	+	+	+
11	+	+	–	+	+
12	+	+	+	–	+
13	–	–	–	+	+
14	–	–	+	–	+
15	–	+	–	–	+
16	+	–	–	–	+
17	+	+	+	+	–
18	+	–	+	–	–
19	–	–	+	+	–
20	+	+	–	–	–
21	–	+	+	–	–
22	+	–	–	+	–
23	–	–	–	–	–
24	–	+	–	+	–
25	–	+	+	+	–
26	+	–	+	+	–
27	+	+	–	+	–
28	+	+	+	–	–
29	–	–	–	+	–
30	–	–	+	–	–
31	–	+	–	–	–
32	+	–	–	–	–

Таким образом, массив данных, полученных в результате проведения эксперимента в соответствии с рототабельным планом для пяти параметров, возможно свести к рототабельному плану по трем параметрам, тогда получится восемь опытов с четырьмя точ-

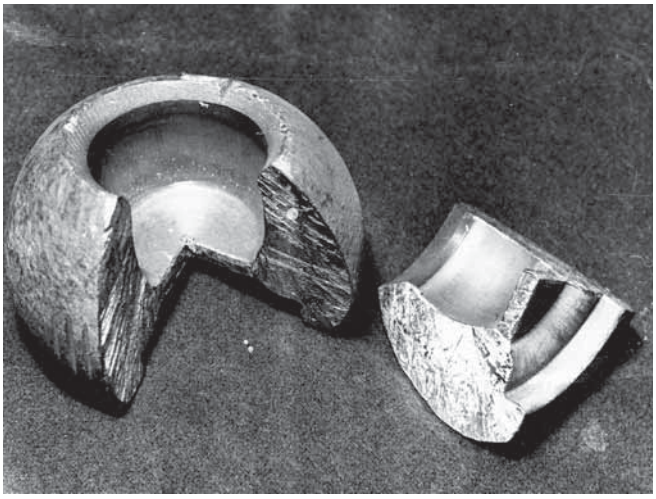


Рис. 2. Прошитая заготовка

ками в каждом из них. В каждой точке имеется некоторый разброс значений, но он не превышает разброса значений размеров использованных заготовок, которые получились такими в силу специфики работы со свинцом. Также полученные данные приведем в безразмерный вид, поделив на диаметр пуансона.

Проведем обработку массива значений с получением регрессионных зависимостей:

$$D_{\max} / d = 2{,}51 + 0{,}12 X_1 + 0{,}07 X_2 - 0{,}001 X_3 - \\ -0{,}01 X_1 X_2 + 0{,}009 X_2 X_3 + 0{,}009 X_1 X_3 - 0{,}006 X_2 X_2 X_3;$$

$$D_{\text{нижн}} / d = 2{,}14 + 0{,}17 X_1 + 0{,}07 X_2 - 0{,}14 X_3 - \\ -0{,}04 X_1 X_2 + 0{,}04 X_2 X_3 + 0{,}05 X_1 X_3 - 0{,}02 X_1 X_2 X_3;$$

3. Результаты замеров заготовки до и после прошивки, мм

Номер образца	D_0	H_0	$D_{\max}$	h_1	h	r	$H_{\text{ср}}$	$D_{\text{верх}}$	$d_{\text{верх}}$	$D_{\text{нижн}}$	$d_{\text{нижн}}$
1	52,4	89,5	81,0	13,3	4,0	3,0	58,1	51,7	37,3	66,2	49,8
2	52,4	59,2	77,1	7,4	3,9	3,0	40,9	52,0	36,5	74,0	52,4
3	37,4	60,0	68,9	13,3	4,2	3,0	30,2	56,0	43,0	49,2	40,5
4	37,2	89,9	73,8	7,4	5,1	3,0	35,8	41,3	36,8	66,8	49,2
5	52,1	89,5	80,4	7,4	4,1	3,0	56,3	52,1	37,4	73,1	50,0
6	52,3	59,5	77,9	13,3	3,5	3,0	40,4	53,9	36,4	65,3	53,8
7	37,4	60,1	70,0	7,4	4,3	3,0	28,6	38,9	36,2	63,2	51,2
8	37,5	90,0	74,1	13,3	3,4	3,0	36,6	43,7	36,4	59,0	46,0
9	37,5	90,2	73,9	13,3	5,1	3,0	36,4	45,1	36,5	52,5	44,8
10	52,5	60,2	76,7	13,3	4,5	3,0	41,9	53,0	36,5	65,1	53,5
11	52,3	88,4	81,2	13,3	3,8	3,0	56,4	50,3	37,2	67,8	50,0
12	52,4	89,0	80,0	7,4	5,0	3,0	57,0	52,9	37,9	71,9	49,9
13	37,3	59,8	68,3	13,3	3,7	3,0	28,4	57,3	–	48,3	40,0
14	37,3	60,0	69,2	7,4	5,4	3,0	28,7	38,5	36,2	63,0	50,0
15	37,4	90,0	73,0	7,4	4,1	3,0	40,6	38,0	36,7	65,1	51,6
16	52,4	58,8	77,3	7,4	4,1	3,0	39,7	52,5	36,5	72,2	52,4
17	52,5	89,0	81,0	13,3	3,6	1,0	57,4	50,5	36,9	66,1	48,3
18	52,4	58,1	76,5	7,4	4,4	1,0	41,1	51,8	36,5	69,6	51,2
19	37,2	60,0	68,4	13,3	4,5	1,0	30,0	56,1	44,9	49,1	39,4
20	52,4	89,5	80,9	7,4	3,9	1,0	56,0	50,2	37,5	72,4	51,8
21	37,3	89,5	75,3	7,4	5,0	1,0	34,4	43,0	36,2	68,2	50,5
22	52,2	59,5	77,2	13,3	3,9	1,0	40,6	53,6	36,2	65,0	53,0
23	37,2	60,0	71,2	7,4	5,2	1,0	34,1	38,1	36,0	65,5	55,2
24	37,2	89,8	75,0	13,3	4,4	1,0	35,8	43,2	36,9	61,0	47,0
25	37,4	89,8	74,8	13,3	5,7	1,0	36,5	46,8	36,2	61,2	45,8

Номер образца	D_0	H_0	D_{max}	h_1	h	r	$H_{ср}$	$D_{верх}$	$d_{верх}$	$D_{нижн}$	$d_{нижн}$
26	52,5	59,6	77,5	13,3	5,8	1,0	41,4	53,1	36,2	64,5	53,0
27	52,3	89,2	81,5	7,4	4,8	1,0	55,0	49,2	37,4	70,9	49,1
28	52,5	89,8	81,8	7,4	6,6	1,0	54,3	48,0	37,0	71,9	50,0
29	37,2	60,0	68,5	13,3	3,9	1,0	29,7	55,2	45,0	49,8	39,9
30	37,3	59,5	69,3	7,4	7,5	1,0	27,9	38,5	35,9	61,5	51,1
31	37,2	90,0	74,2	7,4	5,1	1,0	37,4	37,9	36,5	65,1	51,2
32	52,4	59,0	78,0	7,4	5,3	1,0	39,4	49,5	36,5	71,1	52,0
33	44,7	73,9	75,0	10,4	4,4	2,0	41,2	43,0	36,5	65,0	49,9
34	44,6	73,3	75,4	10,4	4,7	2,0	41,7	43,0	36,7	62,5	49,9
35	44,7	74,2	75,5	10,4	4,5	2,0	41,4	43,1	36,5	63,9	50,0
36	44,8	74,0	75,6	10,4	4,2	2,0	40,3	44,2	36,6	66,0	50,8
37	44,8	73,2	75,2	10,4	4,5	2,0	41,8	43,8	36,6	64,3	50,5
38	44,7	74,0	76,0	10,4	4,4	2,0	41,3	45,0	36,9	65,0	49,9
39	44,9	74,3	76,2	10,4	4,4	2,0	42,2	43,3	36,7	64,5	48,9
40	44,8	73,5	75,3	10,4	4,4	2,0	41,3	43,3	36,7	63,9	48,3
41	44,8	73,7	74,9	10,4	4,1	2,0	41,0	42,8	36,3	63,3	47,1
42	44,8	73,5	74,8	10,4	4,4	2,0	41,5	42,4	36,4	–	–

$$D_{верх} / d = 1{,}61 + 0{,}11 X_1 - 0{,}06 X_2 + 0{,}1 X_3 + 0{,}19 X_1 X_2 - 0{,}06 X_2 X_3 - 0{,}09 X_1 X_3 + 0{,}05 X_1 X_2 X_3;$$

$$H_{верх} / d = 1{,}36 + 0{,}26 X_1 + 0{,}19 X_2 + 0{,}003 X_3 + 0{,}07 X_1 X_2 - 0{,}005 X_2 X_3 + 0{,}01 X_1 X_3 + 0{,}003 X_1 X_2 X_3.$$

Получили зависимости, содержащие по восемь членов, попробуем оптимально уменьшить их число путем исключения малозначимых из них:

$$D_{max} / d = 2{,}51 + 0{,}12 X_1 + 0{,}07 X_2 - 0{,}01 X_1 X_2;$$

$$D_{нижн} / d = 2{,}14 + 0{,}17 X_1 + 0{,}07 X_2 - 0{,}14 X_3 - 0{,}04 X_1 X_2 + 0{,}04 X_2 X_3 + 0{,}05 X_1 X_3 - 0{,}02 X_1 X_2 X_3;$$

$$D_{верх} / d = 1{,}61 + 0{,}11 X_1 - 0{,}06 X_2 + 0{,}1 X_3 + 0{,}19 X_1 X_2 - 0{,}06 X_2 X_3 - 0{,}09 X_1 X_3 + 0{,}05 X_1 X_2 X_3;$$

$$H_{верх} / d = 1{,}36 + 0{,}26 X_1 + 0{,}19 X_2 + 0{,}07 X_1 X_2 + 0{,}01 X_1 X_3.$$

Определим значимость отброшенных членов:
для 1-й зависимости:

$$SS_{отбр} = 50{,}7201 - (2{,}51^2 + 0{,}12^2 + 0{,}07^2 + 0{,}01^2) \cdot 8 = 0{,}1641;$$

для 4-й зависимости:

$$SS_{отбр} = 15{,}7034 - (1{,}36^2 + 0{,}26^2 + 0{,}19^2 + 0{,}07^2 + 0{,}01^2) \cdot 8 = 0{,}037.$$

Видно, что значимость отброшенных членов мала и в том и в другом случае.

Для проверки адекватности линейных регрессионных зависимостей и оценки ошибки эксперимента проведены десять опытов в центре эксперимента.

Для 1-й зависимости: $SS_{ош} = 63{,}1537 - 25{,}13^2 / 10 = 0{,}002$; $S^2_{ош} = 0{,}002 / 9 = 0{,}0002$; $D_{max} / d = 2{,}51 \pm 2{,}23(0{,}0002 / 10)^{0{,}5} = 2{,}51 \pm 0{,}01$, т.е. в центре эксперимента она адекватна.

Для 2-й зависимости: $SS_{ош} = 41{,}3122 - 19{,}28^2 / 9 = 0{,}01$; $S^2_{ош} = 0{,}01 / 8 = 0{,}00125$; $D_{нижн} / d = 2{,}14 \pm 2{,}27(0{,}00125 / 9)^{0{,}5} = 2{,}14 \pm 0{,}03$, т.е. в центре эксперимента она адекватна.

Для 3-й зависимости: $SS_{ош} = 20{,}8861 - 14{,}45^2 / 10 = 0{,}0059$; $S^2_{ош} = 0{,}0059 / 9 = 0{,}00066$; $D_{верх} / d = 1{,}45 \pm 2{,}23(0{,}00066 / 10)^{0{,}5} = 1{,}45 \pm 0{,}02$, т.е. в центре эксперимента она неадекватна.

Для 4-й зависимости: $SS_{ош} = 18{,}9081 - 13{,}75^2 / 10 = 0{,}0019$; $S^2_{ош} = 0{,}0019 / 9 = 0{,}0002$; $H_{верх} / d = 1{,}38 \pm 2{,}23(0{,}0002 / 10)^{0{,}5} = 1{,}38 \pm 0{,}01$, т.е. в центре эксперимента она неадекватна.

Так как десять опытов в центре эксперимента, проведенного для пяти параметров, для трех параметров излишне, то возьмем выборку в шесть опытов из

выборки в десять опытов и проверим адекватность в центре эксперимента последних двух зависимостей.

Для 3-й зависимости: $SS_{ош} = 12,7633 - 8,75^2/6 = 0,0029$; $S^2_{ош} = 0,0029/5 = 0,0058$; $D_{верх}/d = 1,46 \pm 2,57\,(0,0058/6)^{0,5} = 1,46 \pm 0,03$, т.е. в центре эксперимента она все равно неадекватна.

Для 4-й зависимости: $SS_{ош} = 11,3178 - 8,24^2/6 = 0,0015$; $S^2_{ош} = 0,0015/3 = 0,0003$; $H_{верх}/d = 1,38 \pm 2,57(0,0003/6)^{0,5} = 1,38 \pm 0,02$, т.е. в данном случае в центре эксперимента она адекватна.

Рассмотрим подробнее результаты исследования, относящиеся к 3-й зависимости. Обычно при неадекватности модели в центре проводят дополнительные опыты в звездных точках, но в данном случае при изучении полученных в ходе исследования образцов они получатся, когда диаметр пуансона меньше или равен диаметру заготовки, т.е. на первом этапе будет происходить процесс осадки, но со значительной неоднородностью деформации. Если данную зависимость проанализировать с точки зрения полученной ошибки эксперимента в его точках, где было проведено по четыре опыта, и выбрать из них максимальную, тогда: 1,61±0,13, а в центре эксперимента: 1,46±0,06. Как видно, что их доверительные интервалы пересекаются, и 3-ю зависимость можно записать как

$$D_{верх}/d = 1,51 + 0,11X_1 - 0,06X_2 + 0,1X_3 + 0,19X_1X_2 - 0,06X_2X_3 - 0,09X_1X_3 + 0,05X_1X_2X_3,$$

погрешность равна 1,51±0,11.

Полученная система зависимостей имеет вид:

$$D_{max}/d = 2,51 + 0,12X_1 + 0,07X_2 - 0,01X_1X_2;$$

$$D_{низ}/d = 2,14 + 0,17X_1 + 0,07X_2 - 0,14X_3 - 0,04X_1X_2 + 0,04X_2X_3 + 0,05X_1X_3 - 0,02X_1X_2X_3;$$

$$D_{верх}/d = 1,51 + 0,11X_1 - 0,06X_2 + 0,1X_3 + 0,19X_1X_2 - 0,06X_2X_3 - 0,09X_1X_3 + 0,05X_1X_2X_3;$$

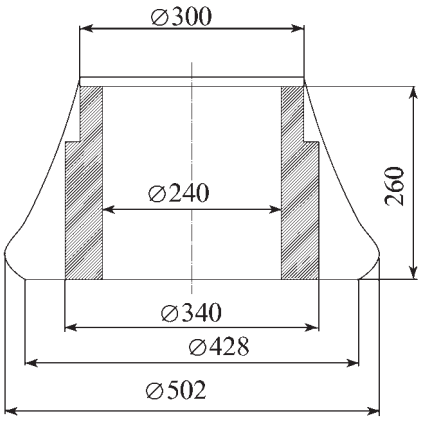


Рис. 3. Схема заготовки детали замка под механическую обработку

$$H_{верх}/d = 1,36 + 0,26X_1 + 0,19X_2 + 0,07X_1X_2 + 0,01X_1X_3.$$

Возможные схемы реализации. *Пример 1.* Допустим, необходимо изготовить заготовку ступенчатой части втулки (рис. 3, внутренняя заштрихованная втулка) (см. например, пат. 2385791 РФ).

При этом сначала разбивают заготовку на ступени, затем определяют массу каждой ступени отдельно, затем рассчитывают размеры ступенчатой заготовки, служащей заготовкой под раскатку на оправке, после чего путем сглаживания контуров преобразуют ее в фигуру, по размерам которой рассчитывают размеры заготовки под двухстороннюю прошивку, используя приведенные выше формулы.

Деление поперечного сечения на элементы применяют при расчете калибровки прокатных станов при прокатке сложных профилей, при этом важно, чтобы такое деление отражало процесс деформации металла, а не носило условный искусственный характер (см. например, Чекмарев А.П. и др. Калибровка прокатных валков. М.: Металлургия, 1971. С. 458; или Рудской А.И. и др. Теория и технология прокатного производства. СПб.: Наука, 2005. С. 394.).

Для реализации данного примера сначала разбивают часть втулки на элементы: верхний патрубок и нижний патрубок, затем назначают припуски: нижний патрубок – ∅300/∅240×75 мм, верхний патрубок – ∅340/∅240×185 мм, после чего определяют массу по элементам: нижний патрубок – 15 кг, верхний патрубок – 66 кг, затем определяют массу по элементам

нижний патрубок

$$D = \frac{15 \cdot 40,55}{0,07 \cdot 45} + 45 = 238 \text{ мм}; \quad d = 238 - 2 \cdot 45 = 148 \text{ мм};$$

верхний патрубок

$$D = \frac{66 \cdot 40,55}{0,175 \cdot 70} + 70 = 288 \text{ мм}; \quad d = 288 - 2 \cdot 70 = 148 \text{ мм}.$$

Полученная заготовка представлена на рис. 4, где полужирной линией проведен сглаживающий сплайн. При этом получили D_{max} = 364 мм; $D_{нижн}$ = 306 мм; $D_{верх}$ = 238 мм; $H_{верх}$ = 255 мм; d = 135 мм; h_1 = 16,2 мм. Далее из системы зависимостей определяют D_0 и H_0. При полученных данных системе зависимостей удовлетворяют $X_1 = +1$; $X_2 = +1$ и $X_3 = +1$, тогда D_0 = 236 мм и H_0 = 405 мм. Проверка решения проведена на пластилиновых образцах в масштабе 1/10 и получены удовлетворительные результаты. Из примера также видно, что эффективность и металлоемкость заготовки зависят от размерных соотношений детали.

Пример 2. Допустим, необходимо изготовить заготовку ступенчатой части втулки (см. рис. 3, внутренняя заштрихованная втулка) (см. например, пат. 2385791 РФ).

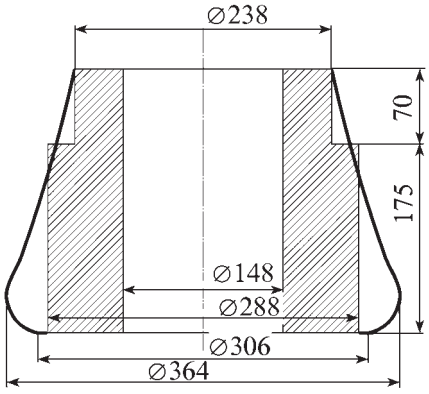


Рис. 4. Схема заготовки детали замка под раскатку

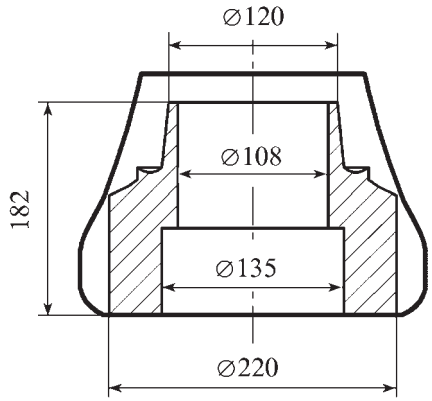


Рис. 5. Схема заготовки вкладыша подшипника под механическую обработку

При этом на ступенчатой заготовке проводят сглаживание ее контуров, преобразуя в фигуру, по которой рассчитывают размеры заготовки с учетом припусков под механическую обработку под двухстороннюю прошивку и полученную прошитую поковку механически обрабатывают на станке с получением ее окончательных размеров (см. рис. 3).

Тогда получаем D_{max} = 502 мм; $D_{нижн}$ = 428 мм; $D_{верх}$ = 302 мм; $H_{верх}$ = 272 мм; d = 200 мм; h_1 = 20 мм. Далее из системы зависимостей определяют D_0 и H_0. При полученных данных системе зависимостей удовлетворяют $X_1 = 0$; $X_2 = 0$ и $X_3 = 0$. Тогда D_0 = 300 мм и H_0 = 500 мм. Проверка решения проведена на пластилиновых образцах в масштабе 1/10 и получены удовлетворительные результаты. Из примера также видно, что эффективность и металлоемкость заготовки зависят от размерных соотношений детали.

Пример 3. Допустим, необходимо изготовить заготовку детали типа "подшипниковый щит" (рис. 5) (см. например, Г.Н. Кулик, В.А. Назарьян. Расширение технологических возможностей прошивного пресса // Станочный парк. 2009. № 12(67). С. 19–21.)

Тогда получаем D_{max} = 264 мм; $D_{нижн}$ = 226 мм; $D_{верх}$ = 171 мм; $H_{верх}$ = 185 мм; d = 98 мм; h_1 = 12 мм. Далее из системы зависимостей определяют D_0 и H_0. При полученных данных системе зависимостей удовлетворяют $X_1 = +1$; $X_2 = +1$ и $X_3 = +1$. Тогда D_0 = 172 мм и H_0 = 294 мм. Проверка решения проведена на пластилиновых образцах в масштабе 1/10 и получены удовлетворительные результаты. Из данного примера видно, что эффективность в этом случае выше, чем в примере 2.

Заключение. Исследование показало, что для получения кольцевых заготовок с переменным профилем поперечного сечения возможно избежать лишних затрат, которые возникают при их изготовлении из кольцевых поковок прямоугольного профиля. Однако эффективность использования приведенных зависимостей должна решаться в каждом случае отдельно, особенно при применении различных марок сталей и сплавов.

Георгий Николаевич Кулик,
kulik.georgnik@rambler.ru

Читайте в следующем номере:

- **Галкин В.В., Кудрявцев С.А., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А.** Методика расчета конечных пластических деформаций металлоизделий, изготовленных многопереходными процесами холодной объемной штамповки
- **Галкин В.В., Герасимов С.А., Дербенев А.А.** Оценка повышения прочностных характеристик гаечных изделий, изготовляемых пятипозиционными процессами холодной высадки
- **Галкин В.В., Поздышев А.И., Поздышев В.А., Вашурин А.В.** Изготовление толстолистовой оболочки защитного шлема из высокопрочных алюминиевого и титанового сплавов методом глубокой горячей вытяжки

УДК 621.965

Д.В. Овчинников *(ОАО "Синарский трубный завод", г. Каменск-Уральский),*
А.А. Богатов, М.В. Ерпалов *(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)*

Новый способ резки непрерывно-литых заготовок*

Приведены основные результаты лабораторных, компьютерных и промышленных исследований процесса резки трубных заготовок, на основе которых разработан новый способ резки, обеспечивающий одновременное профилирование концов и разделение заготовок. Применение нового способа резки в линии трубопрокатного агрегата перед трехвалковым обжимным станом позволяет улучшить условия нестационарных стадий обжатия и прошивки заготовок и повысить качество готовых труб.

Ключевые слова: резка заготовок; ножницы горячей резки; непрерывно-литая заготовка; конечно-элементное моделирование; качество труб.

The main results of laboratory, computer and industrial researches of sections cutting are presented. Finely the new technique of cutting is developed which provided the ending forming and section separation simultaneously. The use of this new technique in pipe-rolling mill line before three-high stand of screw rolling allows to improve conditions of reduction and piercing section nonstationary stages and to increase the final tubes quality.

Keywords: sections cutting; hot shears; section; finite-element modeling; tubes quality.

В ОАО "Синарский трубный завод" на трубопрокатном агрегате ТПА-80 была разработана технология производства высокопрочных насосно-компрессорных труб, а также труб в коррозионно-стойком и хладостойком исполнениях, удовлетворяющих современным требованиям потребителей и пригодных для использования в условиях Крайнего Севера и Сибири [1].

Новая технология основана на применении непрерывно-литой заготовки, обеспечивающей высокое качество труб по микроструктуре стали и уровню механических свойств. Анализ новой технологии выявил некоторые трудности ее реализации, обусловленные образованием в процессе обжатия непрерывно-литых заготовок концевых утяжин, появлением отслоений металла в виде полуколец на заднем конце заготовки после прошивки и образованием дефектов в виде "раковина–вдав" на поверхности готовых труб (рис. 1).

Определено, что придание специальной формы концам заготовки в линии ТПА на ножницах горячей резки перед обжимным станом является наиболее эффективным с точки зрения уменьшения глубины утяжины при обеспечении необходимой производительности агрегата в целом. Проведено физическое и математическое моделирование процесса резки, а также выполнены промышленные эксперименты. В результате разработан новый способ резки, обеспечивающий профилирование заготовки в процессе ее разделения.

Физическое моделирование выполнено на специальном устройстве, представляющем собой лабораторные ножницы с установкой деревянных ножей с различными калибровками. Разработаны чертежи опытных ножей и определены формы концов пластилиновых заготовок после резки. В результате физического моделирования выявлена принципиальная возможность разработки способа резки с одновременным приданием концу заготовки рациональной формы.

Для выбора оптимальной калибровки ножей и прокладок выполнено математическое моделирование процесса резки. Моделирование проведено с помощью программы Deform-3D (рис. 2).

При математическом моделировании установлено влияние высоты (параметр $h/D_з$, где $D_з$ – диаметр заго-

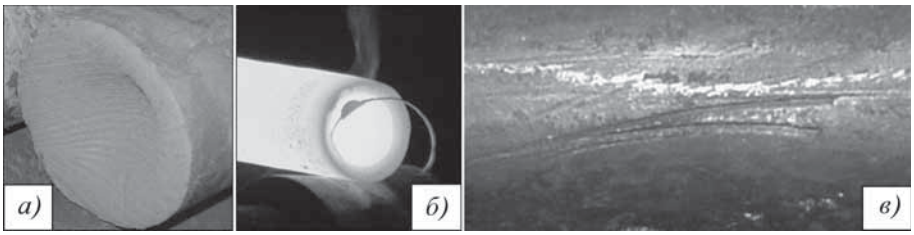


Рис. 1. Внешний вид задней по ходу прокатки утяжины (*а*), полукольца (*б*) и дефекта "раковина–вдав" (*в*)

* Статья подготовлена в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

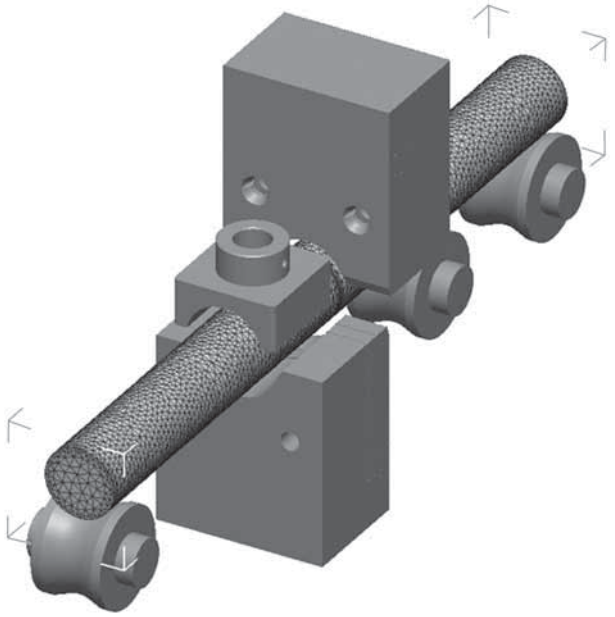


Рис. 2. Модель ножниц горячей резки в программе Deform-3D

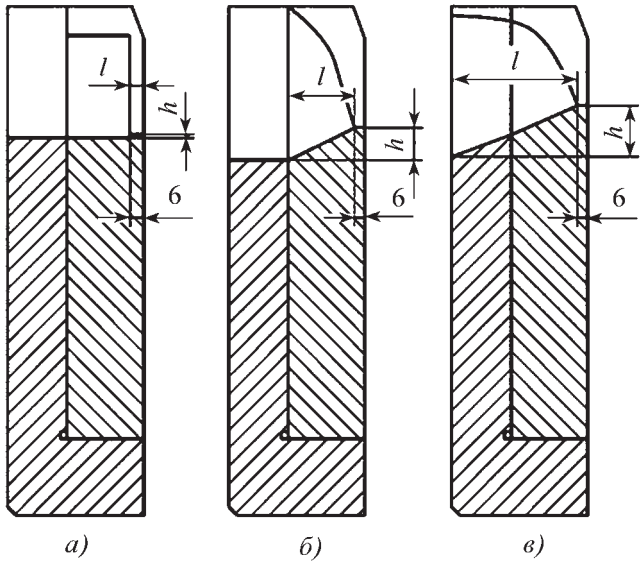


Рис. 3. Профили ножей и прокладок в поперечном сечении

товки) и длины (параметр $l/D_з$) "зуба" (рис. 3), а также несимметричной схемы установки ножей на формоизменение концевых частей заготовок после резки.

Математическое моделирование проведено в несколько этапов. На первом этапе были получены данные о формоизменении концевых частей заготовок при резке с использованием ножей с серийной калибровкой. Далее были определены влияние на формоизменение металла длины и высоты "зуба", а также влияние схемы установки инструмента. На заключительном этапе моделирования осуществлен поиск оптимальной калибровки ножей для ножниц горячей резки.

Форма концевой части характеризуется наличием участков смятия, образующихся в результате контакта металла с инструментом, и наличием участков внеконтактной деформации [2]. В результате решения задач математического моделирования с применением ножей конической формы и прокладок цилиндрической формы (см. рис. 3, *б*) было определено, что с увеличением высоты "зуба" на 11 мм высота участков смятия увеличивается в среднем на 5 мм, при этом их длина уменьшается примерно на 5 мм. На размеры и форму зон внеконтактной деформации высота "зуба" влияния не оказывает. Установлено, что увеличение длины зуба за счет конусной калибровки прокладки (см. рис. 3, *в*) способствует увеличению зон смятия при практически постоянных размерах участков внеконтактной деформации, при этом размеры этих зон становятся практически одинаковыми, что свидетельствует об улучшении процесса резки.

В статье рассмотрено применение несимметричной схемы реза, т.е. установки на ножницах нижнего и верхнего инструмента с различной калибровкой (см. рис. 3, *а* и *в* соответственно), что позволяет перераспределить деформацию между передним и задним концом заготовки. Так как кольцевые разрушения металла на гильзах, вызванные наличием утяжин, образуются с заднего конца заготовки, то целесообразно сконцентрировать деформацию смятием при резке на заднем конце заготовки. Расчеты моделирований позволяют утверждать, что применение несимметричной схемы установки ножей обеспечивает перераспределение деформации в сторону заднего конца заготовки (рис. 4), что является эффективным и позволяет сформировать более выпуклый задний конец заготовки.

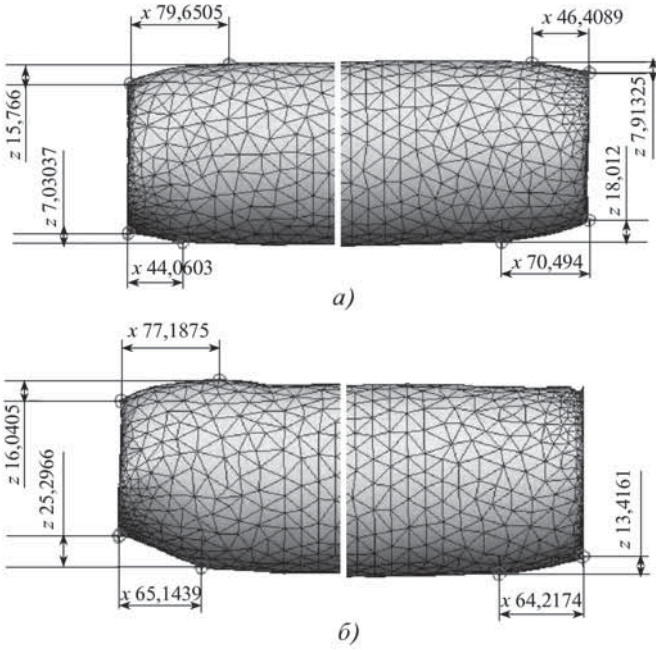


Рис. 4. Результаты математического моделирования:
а – формы концов при использовании серийной калибровки; *б* – формы концов при выборе оптимальной калибровки

Рис. 5. Конец гильзы при прошивке заготовки после обжатия: *а* – осуществлена схема резки без профилирования конца заготовки; *б* – с профилированием конца заготовки

Для подтверждения данных, полученных при математическом моделировании, на ТПА-80 (ОАО "Синарский трубный завод") выполнено промышленное исследование нового способа резки трубных заготовок. При этом особое внимание было уделено образованию утяжин на задних концах разрезанных заготовок. Установлено, что результаты промышленных экспериментов и математического моделирования качественно соответствуют друг другу. Найдена оптимальная калибровка инструмента ножниц горячей резки, способствующая уменьшению глубины утяжин до значений, при которых образование дефектов в виде полуколец не наблюдается (рис. 5).

В результате исследований разработан новый способ резки, обеспечивающий одновременное разделение металла и профилирование концевых частей заготовок. Опытным путем подтверждена высокая эффективность способа резки с точки зрения обеспечения качества готовой продукции за счет сокращения размеров утяжины и уменьшения образования полуколец на заднем конце прошитой гильзы. На указанный способ резки подана заявка на патент № 2011118932, а сам способ внедрен в производственный процесс на ТПА-80 ОАО "Синарский трубный завод".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2361689 Российская Федерация, МПК B 21 B 19/04.** Способ получения гильз / Д.В. Овчинников и др.; заявитель и патентообладатель ОАО "Синарский трубный завод". № 2007145344/02; заявл. 06.12.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20.

2. **Соловцов С.С.** Отрезка в штампах точных заготовок сортового проката. М.: Металлургия, 1980. 49 с.

Дмитрий Владимирович Овчинников;
Александр Александрович Богатов, д-р техн. наук;
Михаил Викторович Ерпалов,
mihail.erpalov@mail.ru

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал "Заготовительные производства в машиностроении" читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами в России и странах ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Наш журнал распространяется только по подписке – это является надежной гарантией того, что Ваше рекламное объявление прочитают именно специалисты, т.е. оно попадет точно в цель.

Обращайтесь в отдел продаж, маркетинга и рекламы
ООО "Издательство Машиностроение":
107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4.
Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98. Факс (499) 269-48-97.
E-mail: marketing@mashin.ru www.mashin.ru

УДК 621.9.047

С.Ю. Жачкин, А.А. Живогин*, Н.А. Пеньков,
(Воронежский государственный технический университет,
** Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,*
п. Монино, Московская обл.),
О.А. Сидоркин, В.Ф. Лазукин *(Военный авиационный университет, г. Воронеж)*

Повышение износостойкости деталей гидроприводов прессового оборудования

Изложен подход к проблеме увеличения износостойкости гидроагрегатов прессового оборудования. Приведены данные исследования износостойкости стандартного хромового покрытия и покрытия, полученного по технологии гальваноконтактного осаждения.

Ключевые слова: гидравлика; композитные покрытия; износостойкость.

The approach to problem of increase in wear resistance of hydraulic units press equipment is stated. The given researche of wear resistance of standard chromic coating and coating received by technology galvanic-contact plating of sedimentation are presented.

Keywords: hydraulics; composite coatings; wear resistance.

Одним из важнейших звеньев технологической цепи современного цикла производства деталей машин является заготовительное производство, в котором широко применяется прессовое оборудование. Точность, долговечность и надежность современных прессов во многом определяются управляющими и силовыми гидравлическими приводами, используемыми в конструкции оборудования, которые работают со значительными рабочими давлениями в системе.

Для увеличения ресурса контактные поверхности деталей гидроагрегатов подвергают различной механической и физико-технической обработке. Однако применение большинства методов связано как с температурным, так и с силовым воздействием на контактную поверхность. Все это приводит к необратимым деформациям деталей, что снижает их ресурс, а иногда вызывает заклинивание, что может привести к поломке оборудования и травмам на производстве.

Обеспечить необходимые физико-механические свойства поверхностного слоя деталей гидроагрегатов, точность поверхности при изготовлении и восстановлении и, как следствие, требуемый их ресурс, способны холодные гальванические методы нанесения покрытия.

В современном производстве большинства изделий регулирующей и силовой гидроаппаратуры для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств применяют гальваническое хромирование. Этот холодный метод воздействия на поверхностный слой позволяет избежать негативных явлений, возникающих при использовании горячих методов обработки. К покрытиям, применяемым для гидроаппаратуры, предъявляют ряд требований: они должны обладать хорошей адгезией, герметичностью, низкой шероховатостью поверхности (при условии возможности достижения значительной толщины покрытия) и достаточной износостойкостью.

Хромирование, используемое в настоящее время для этих целей, наряду с преимуществами имеет следующие недостатки: снижение надежности узла из-за негерметичности хрома при высоком давлении в системе; низкая адгезия, особенно при нанесении толстых покрытий; снижение малоцикловой усталости деталей.

Другой недостаток заключается в необходимости механической обработки детали после восстановления для обеспечения требуемой шероховатости поверхности, макрогеометрии и размеров, заданных чертежом. В результате толщина хромового покрытия, наносимая на деталь для обеспечения работоспособности узла, как правило, составляет от 120 мкм и выше. Качественные герметичные покрытия такого размера, необходимые для работы прессового гидрооборудования, получить практически невозможно. Существующие методы получения толстых гальванических покрытий отличаются нестабильностью процесса и низким качеством, поэтому их применение в ответственных изделиях прессового оборудования требует значительных дополнительных трудозатрат по обеспечению качества наносимого осадка.

Для решения данной проблемы было предложено наносить дисперсно-упрочненные композитные гальванические покрытия методом *гальваноконтактного осаждения* (ГКО), который обеспечивает заданную толщину и равномерность покрытия на всем его протяжении, а также позволяет управлять знаком и величиной остаточных напряжений в покрытии.

Сущность метода ГКО заключается в периодической упруго-пластической деформации растущих слоев покрытия в процессе их осаждения посредством инструмента. Таким образом, периодическое механическое воздействие на растущие кристаллы гальванического хрома вызывает временную остановку их роста в момент прохождения зоны механической активации инструментом. Это формирует слой композитного покрытия. После прохождения инструмента рост кристаллов хрома возобновляется до следующего их контакта с инструментом, что формирует последующий слой гальванического композитного покрытия. Данный процесс повторяется периодически во время проведения процесса ГКО. Учитывая данную особенность способа, на поверхности детали получается слоистый композит.

Принцип метода ГКО при нанесении гальванического композита на внутренние цилиндрические поверхности заключается в одновременном сочетании вращательного движения инструмента и его возвратно-поступательного движения в процессе нанесения покрытий. Схема метода показана на рисунке.

Главная особенность получаемых композитных хромовых покрытий – повышенное сопротивление износу по сравнению со стандартными хромовыми покрытиями. Износ – это нежелательное изменение поверхности предмета вследствие отрыва от нее мельчайших частиц. Отрыв частиц может произойти по причинам механического порядка, но часто, одновременно с механическими нагрузками наблюдаются также и химические реакции между трущимися парами или с окружающей средой.

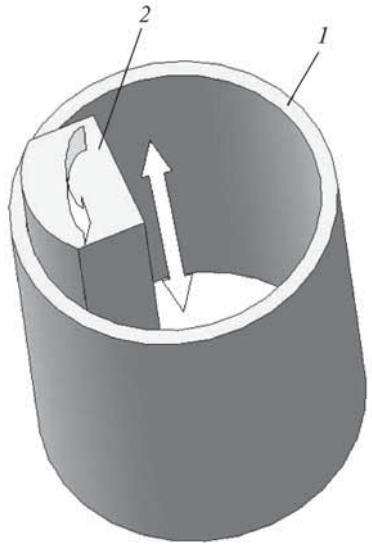


Схема метода гальваноконтактного осаждения
1 – деталь; *2* – инструмент

Огромное количество деталей гидроагрегатов прессового оборудования, подверженных трению, эксплуатируется в условиях высоких нагрузок, незначительных скоростей скольжения и низких температур поверхностей трения. По условиям эксплуатации эти узлы условно делят на две группы:

1. Детали, работающие в условиях возвратно-вращательного движения.

2. Детали, работающие в условиях возвратно-поступательного движения.

При таком виде трения отсутствуют какие-либо структурные изменения, перенос материала с одной поверхности на другую. Износ обусловлен в основном абразивным воздействием частиц на контактируемые пары. При применении одной из сопрягаемых деталей с хромовым покрытием износ наблюдается в основном на детали с меньшей твердостью. У деталей с хромовым покрытием отсутствуют риски от абразивных частиц и следы от задиров, а износ деталей относительно невелик по сравнению с нехромированными деталями. Поэтому, по возможности, детали гидроагрегатов прессового оборудования подвергают хромированию.

Учитывая особенности производства деталей гидрооборудования, образцы для исследований изготовляли из сталей 30ХГСА (ТУ 14-1-950–74), 30ХГСН2А (ТУ 14-1-950–74) цилиндрической формы, для того чтобы имитировать наиболее близкие условия эксплуатации узлов.

Наружный диаметр образцов 25 мм, длина 145...150 мм. Образцы подвергали термической обработке до $\sigma_в$ = 1100...1450 МПа, шлифованию до параметра шероховатости поверхности Ra = 2,5...1,25 мкм и затем отпуску при температуре 200...230 °С в течение 2...3 ч.

Покрытия осаждались в стандартном электролите хромирования, содержащем 200...250 г/л CrO_3 и 2,0...2,5 г/л H_2SO_4, наиболее широко применяемым на машиностроительных предприятиях. Для проведения экспериментальных исследований электролит приготовляли из реактивов "ХЧ" и "ЧДА" на дистиллированной воде по методике, описанной в [1]. Плотность электролита измеряли ареометром, а кислотность pH-метро-милливольтметром мод. pH-121. Температуру электролита поддерживали с точностью 1 К термометром ТПП-11 (ГОСТ 13717–84) и контролировали термометром ТН-5 (ГОСТ 400–80) с ценой деления шкалы 0,2 К. Корректировку электролита и его анализ проводили по методике, изложенной в [2].

В связи с тем, что площадь хромирования гильз гидроаппаратуры серийных изделий прессового оборудования составляет от 1 до 40 дм^2, а на имеющемся в гальванических цехах отрасли оборудовании затруднительно получение плотности тока выше 200 А/дм^2, максимальная плотность тока для исследований была выбрана 350 А/дм^2.

1. Характеристики покрытий, нанесенных различными методами

Метод нанесения покрытия	Параметр шероховатости *Ra*, мкм	Микротвердость HV, МПа	Толщина покрытия, мкм	Наличие сетки трещин в покрытии
Стандартное хромирование	0,1...0,16	9800...10500	190...210	Присутствует
ГКО	0,04...0,06	10420...11500	190...210	Отсутствует

Ограничение по плотности тока вызвано также тем, что прохождение больших токов приводит к значительному нагреву деталей, затрудняет создание надежных токоподводов к ним и не позволяет поддерживать в процессе обработки стабильные технологические режимы.

Нанесение хромовых покрытий осуществляли по следующим режимам:

стандартное хромирование:

плотность тока, кА/м^2 5

температура электролита, °С. 55

технология ГКО:

плотность тока, кА/м^2 20

температура электролита, °С. 63

давление инструмента, МПа 2,0

частота вращения детали, об/мин 140

число двойных ходов инструмента, дв. х./мин . . 140

До нанесения покрытия детали подвергали одинаковой обработке:

– после шлифования – отпуск при температуре 200...230 °С в течение 2...3 ч;

– магнитный контроль;

– обезжиривание;

– промывка и сушка;

– для создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое до хромирования все детали, на которые в последующем наносили хромовые покрытия по технологии стандартного осаждения, подвергали гидропескоструйной обработке при давлении 500 кПа корундовым песком (ГОСТ 3647–80).

Для испытаний на износоустойчивость были взяты образцы с покрытиями, нанесенными следующими методами: восстановленные по стандартной технологии гальваническим хромированием и по технологии ГКО (серия 2). Характеристики образцов и нанесенных на них покрытий приведены в табл. 1.

Интенсивность изнашивания исследуемых пар при различных удельных нагрузках на базе $N = 1 \cdot 10^6$ колебаний представлена в табл. 2.

Для возможности проведения сравнительного анализа износостойкости покрытий, полученных по различным технологиям, исследования были проведены по режимам проверки износостойкости, опубликованных в [3].

Из анализа данных, приведенных в табл. 2, следует, что с повышением нагрузок интенсивность изнашивания увеличивается. Видно, что при повышенных значениях нагрузок ($P \approx P_{кр}$) интенсивность изнашивания исследуемой пары трения с покрытием по методу ГКО, ниже, чем серийной пары трения. Однако, несмотря на неизменную качественную динамику процесса, количественная характеристика процесса несколько изменилась в сторону увеличения износостойкости покрытия, полученного методом ГКО по сравнению с методом стандартного осаждения хромовых покрытий. Объяснение этому авторы статьи видят в особой структуре получаемого покрытия и одновременном упрочнении поверхностного слоя наносимого покрытия.

2. Интенсивность изнашивания хромовых покрытий

Нагрузка на узел трения, МПа	Интенсивность износа, мкм/мин	
	Стандартный узел трения	Узел трения по технологии ГКО
	Пористое покрытие	Герметичное покрытие
18,8	0,00143...0,00237	0,00114...0,00129
42,3	0,00720...0,0350	0,00587...0,00628

Результаты исследований позволяют представить механизм поверхностного упрочнения следующим образом. При контакте инструмента с покрытием происходит пластическая деформация наносимого слоя. В процессе деформации большую роль играют искажения (дефекты) кристаллической решетки. Идеальная решетка до последнего времени была положена в основу теоретических расчетов механических свойств материала, реальная решетка всегда имеет различного рода дефекты, которые и являются причиной большого расхождения между величинами теоретического и реального сопротивлений сдвигу сил в различных металлах.

Под действием напряжений от внешних сил в искажениях кристаллической решетки возникает пластическая деформация, зарождаясь первоначально в микрообъемах, вследствие своего сдвигового характера пластическая деформация распространяется по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям. Внутри зерен происходит интенсивное образование и движение дислокаций.

Авторами статьи установлено, что скорость образования дислокаций в покрытии возрастает как с увеличением времени действия, так и с повышением деформирующих напряжений. Движущиеся дислокации, встречаясь с препятствиями (например, с дислокациями, расположенными в другой плоскости), блокируются, т.е. происходит их закрепление.

Пластическая деформация приводит также к образованию точечных дефектов, плотность которых в наклепанном материале также увеличивается. Скопления точечных дефектов могут быть источниками новых дислокаций.

Исследования показали, что при пластической деформации происходит раздробление кристаллов на фрагменты и блоки с большими искажениями кристаллической решетки на их границах. Границы фрагментов и блоков служат препятствием для сдвиговой деформации, и с увеличением количества фрагментов и блоков соответственно возрастает и число границ, около которых задерживаются дислокации.

Увеличение степени разориентировки фрагментов и блоков дополнительно повышает сопротивление границ прохождению через них дислокаций, что также увеличивает сопротивление деформированию. Это является основной причиной упрочнения материала покрытия при его пластической деформации в процессе осаждения. По-видимому, процесс дробления блоков с силой микроискажений происходит до известного предела, зависящего от химического состава и физико-механических свойств материала. Как только микроискажения достигнут своего предельного значения, способность решетки к дальнейшей деформации оказывается исчерпанной. Если после этого давление будет расти, то последующее дробление блоков приводит к возникновению микротрещин и разрушению покрытия.

Заключение. Уточнен механизм повышения износостойкости дисперсно-упрочненного композитного покрытия на основе хромовой матрицы. Проведены сравнительные испытания износостойкости деталей гидроагрегатов со стандартным гальваническим покрытием и композитным покрытием, нанесенным по методу ГКО. Экспериментально доказано, что с увеличением нагрузок в обоих случаях интенсивность изнашивания увеличивается, однако, в случае ГКО в меньшей степени.

По результатам исследований повышенную износостойкость и, как следствие, увеличение ресурса имеют детали с покрытием, нанесенным по методу ГКО, в сравнении со стандартным хромовым покрытием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **А. с. 1323611А1, кл. С 25 D 7/04.** Устройство для нанесения электрохимических покрытий на внутреннюю поверхность трубы / В.Н. Малышев (СССР). № 4018197/22–02, 27.01.86; опубл. 15.07.87, Бюл. № 26.

2. **Дасоян М.А., Грихелес С.Я.** Технология электролитических покрытий. Л.: Машиностроение, Ленинград. отделение, 1989. 390 с.

3. **Ковенский И.М.** Испытание гальванических покрытий. Сер. "Специалист-материаловед". М.: Интермет-Инжиниринг, 2001. 136 с.

Сергей Юрьевич Жачкин, д-р техн. наук,
zhach@list.ru;
Александр Анатольевич Живогин;
Никита Алексеевич Пеньков;
Олег Анатольевич Сидоркин, канд. техн. наук;
Владимир Фёдорович Лазукин, д-р пед. наук

УДК 621.762

В.А. Сурков
(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

Механические свойства интерметаллидных материалов на основе системы Fe–Al при воздействии плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления

Предложена обработка интерметаллидных материалов на основе системы Fe–Al плазмой высокочастотного индукционного разряда пониженного давления для повышения механических свойств материала.

Ключевые слова: плазма; порошковые материалы; процесс обработки; технология изготовления образцов.

The processing of intermetallic materials based of Fe–Al system by low-pressure high-frequency induction plasma for increase of mechanical properties of material is offered.

Keywords: plasma; powder materials; specimens production technology.

В *высокочастотной* (ВЧ) плазме пониженного давления в диапазоне 1,33...133 Па любое тело, независимо от того, является ли оно проводником, полупроводником или диэлектриком, является дополнительным электродом. В результате чего у его поверхности так же, как и в приэлектродной области ВЧ-емкостно-

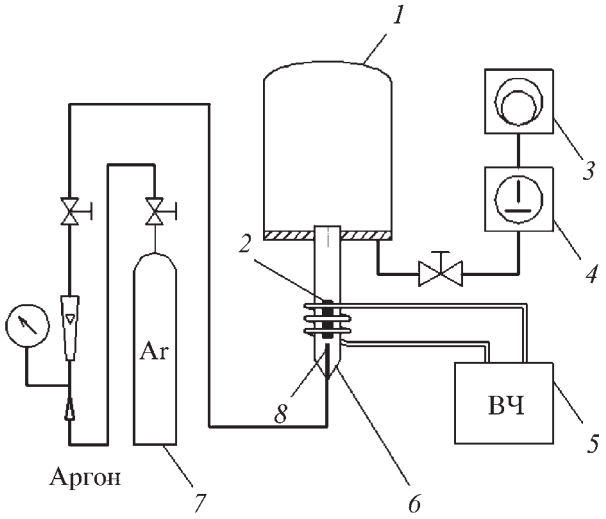


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ВЧИ-разряда пониженного давления для обработки порошкового материала в стаканчик из углеволокна и кварцевой колбе:
1 – вакуумная камера; *2* – стаканчик из углеволокна с порошком (кварцевая колба); *3* – пластинчато-роторный вакуумный насос; *4* – двухроторный вакуумный насос; *5* – ВЧ-генератор; *6* – плазмотрон; *7* – баллон с аргоном; *8* – глухая трубка для установки стаканчика из углеволокна с боковым отверстием для подачи газа

го разряда образуется *слой положительного заряда* (СПЗ) толщиной ~10^{-3} м [1]. Проходя сквозь слой СПЗ и ускоряясь в его электрическом поле, положительные ионы плазмы получают дополнительную энергию до 100 эВ [2, 3].

При столкновении с поверхностью металла ионы передают приобретенную кинетическую энергию и потенциальную энергию рекомбинации поверхностным атомам и частично внедряются в поверхностный слой. Если плазмообразующий газ содержит атомы азота, кислорода или углерода, то в результате диффузионного насыщения поверхностного слоя металла этими элементами увеличиваются механические и физико-химические свойства обрабатываемого металла.

Таким образом, воздействие ВЧ-плазмы пониженного давления на композиционные материалы является перспективным методом, который позволяет варьировать температуру обработки и характеристики ионного потока, поступающего из плазмы на обрабатываемый материал [1–3].

Цель работы – исследование композиционного порошкового материала системы 70 % Fe – 30 % Al,

Технологические параметры процесса воздействия плазмы ВЧИ-разряда пониженного давления

p, Па	*G*, г/с	*I*, А	*U*, кВ	*t*, с
30	0,005	1,0	7,8	5
Обозначения: *p* – давление в камере; *G* – расход газа; *I* – сила тока; *U* – напряжение; *t* – время обработки.				

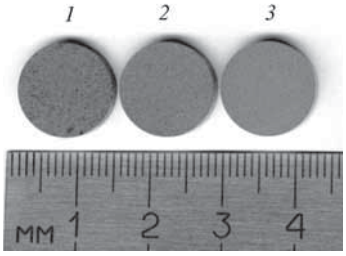


Рис. 2. Спрессованные таблетки из композиционного порошкового материала системы 70 % Fe – 30 % Al:
1, *2* – обработка порошка плазмой в стаканчике из углеволокна и кварцевой колбе соответственно; *3* – исходный порошок

полученного с использованием метода электрофизической обработки.

Воздействие ВЧ-плазмы пониженного давления на композиционный порошковый материал системы 70 % Fe – 30 % Al исследовано путем его поочередного введения в плазменную струю в стаканчике из углеволокна и в "кварцевой колбе". При этом порошок был дегазирован в вакууме. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

В качестве плазмообразующего газа использован аргон. Технологические параметры процесса воздействия плазмы *высокочастотного индукционного* (ВЧИ) разряда пониженного давления приведены в таблице.

После воздействия ВЧИ-разряда пониженного давления на порошок проведено его одностороннее прессование в стальной матрице в таблетки (рис. 2) на прессе мод. "HERZOG" (Германия) с силой 9 кН.

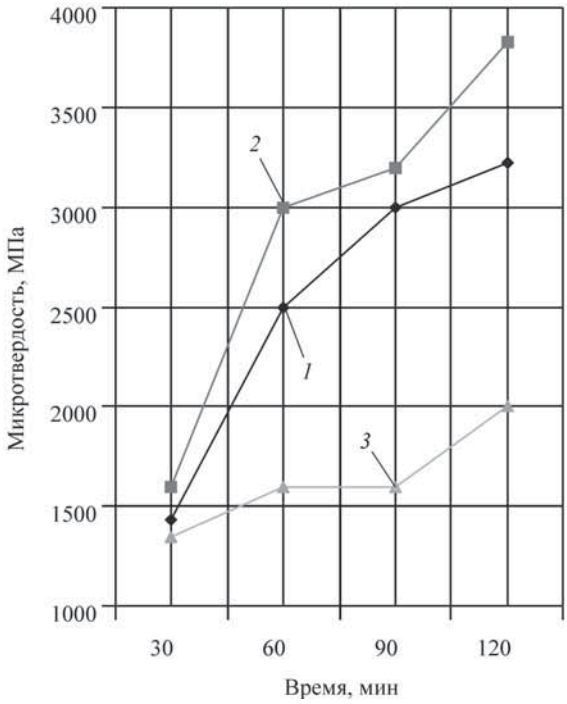


Рис. 3. Микротвердость композиционного порошкового материала системы 70 % Fe – 30 % Al ($T_{спек}$= 700 °С):
1–3 – см. рис. 2

Далее спрессованные таблетки подвергали спеканию в электропечи при температуре 700 °С и замеряли их микротвердость на микротвердомере ПМТ-3 в интервале времени от 30 до 120 мин (рис. 3).

Получено, что при воздействии ВЧ-плазмы пониженного давления на композиционный порошковый материал системы 70 % Fe – 30 % Al микротвердость по сравнению с исходным порошком увеличилась в 2 раза – это позволяет утверждать о целесообразности применения данного метода в машиностроении, в частности в порошковой металлургии, для повышения механических свойств изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С.** Применение ВЧ-плазмы пониженного давления для газонасыщения поверхности металлов // Вестник Казанского технолог. ун-та. 2003. № 1. С. 172–179.

2. **Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кудинов В.В.** Физическая модель взаимодействия высокочастотной плазмы с твердыми телами в динамическом вакууме // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 4. С. 45–51.

3. **Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кудинов В.В.** Математическая модель высокочастотной плазменной обработки материалов в динамическом вакууме // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 6. С. 21–27.

Вячеслав Анатольевич Сурков, канд. техн. наук,
surkov-v@inbox.ru

УДК 669.14:621.785.52

В.Н. Гадалов, В.Р. Петренко*, Ю.В. Скрипкина, Т.Н. Розина, Р.В. Бобрышев, Ю.В. Болдырев**
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск,
** Воронежский государственный технический университет,*
*** Курская государственная сельскохозяйственная академия)*

Повышение работоспособности плунжерных пар из стали (17...20)ХГТ комбинированной нитроцементацией

Приведена технология поверхностного упрочнения плунжеров и втулок дизельных топливных насосов комбинированной нитроцементацией (газовая среда совместно с активизирующей пастой) из недорогой стали 18ХГТ массового выпуска. Показано, что детали из этой стали имеют более высокую износостойкость и стабильность, чем детали из дорогой стали ХВГ, традиционно применяемой для изготовления плунжерных пар.

Ключевые слова: плунжер; втулка; износостойкость; сталь; термическая обработка.

The technology of surface hardening plungers and sleeves of diesel fuel pumps by combined carbonitriding (gaseous atmosphere together with catalytic paste) from cheap steel 18KhGT mass production is resulted. It is shown that details from this steel have higher wear resistance and stability than details from expensive steel KhVG traditionally used for manufacturing plunger pairs.

Keywords: plunger; sleeve; wear resistance; steel; heat treatment.

В настоящее время перед машиностроительным производством, в частности перед изготовителями топливной аппаратуры для дизельных двигателей, остро встает проблема поиска и внедрения низколегированных сталей – заменителей дорогих и дефицитных никель-вольфрамсодержащих сталей. При этом качество изделий из более дешевых безвольфрамовых сталей должно находиться на уровне действующих стандартов, а по возможности и превышать их.

Наиболее распространенные плунжерные пары типа 41.А16с15 для разных топливных насосов согласно требованиям ГОСТ 9927 должны изготовляться из высококачественной инструментальной стали ХВГ, в состав которой входит дефицитный вольфрам. Плунжер и втулка подвергаются термической обработке, состоящей в объемной закалке, обработке холодом и низкому отпуску. Твердость сопрягающихся цилиндрических поверхностей плунжера и втулки должна быть не меньше 60 HRC.

Кроме стали ХВГ для изготовления деталей плунжерных пар на некоторых отечественных предприятиях применяют хромистую азотируемую сталь 25Х5М. Твердость азотированных слоев на деталях из этой стали должна быть не менее 820 HV. Для упрочнения стали 25Х5М необходимо азотирование, которое отличается большой длительностью и приводит к образованию хрупких поверхностных слоев.

Из всех сталей, которые могут быть использованы для изготовления деталей плунжерных пар, была выбрана цементуемая сталь 18ХГТ, выпускаемая по ГОСТ 7417 в массовых количествах. Эта сталь в несколько раз дешевле вольфрамсодержащей стали ХВГ.

Удовлетворение технических требований на детали плунжерных пар из стали 18ХГТ может быть достигнуто в результате нитроцементации в высокоактивном карбюризаторе.

Детали плунжерных пар типа 41.А16с15, плунжеры и втулки после механической обработки подвергают комбинированной нитроцементации в газовой среде с дополнительной активизирующей обмазкой на упрочняемых поверхностях. Обмазку готовят из 80 % газовой сажи и 20 % углекислого бария. Сухие компоненты для получения обмазки, удобной для применения, разводят триэтаноламинолом до консистенции, близкой к жидкой пасте.

После нанесения обмазки (методом окунания) и сушки детали подвергают нитроцементации при температуре 880 °С в течение 6 ч в цементационной печи типа Ц105. В процессе нитроцементации в печь из двух капельниц подается триэтаноламин (60 кап/мин) и синтин (60...120 кап/мин). После нитроцементации детали плунжерных пар подвергают закалке: с температуры нитроцементации, так как сталь 18ХГТ является наследственно мелкозернистой или с повторного нагрева с охлаждением в масле.

В результате такой обработки на поверхностях плунжеров и внутренних поверхностях втулок образуются достаточно глубокие (до 0,2 мм) диффузионные слои с большим количеством глобулярных карбидов в мартенситной матрице. При этом в сердцевине отсутствует остаточный аустенит, что обеспечивает более стабильную структуру по сравнению со сталью ХВГ.

Лучшее качество плунжерных пар, изготовленных в опытном порядке из стали 18ХГТ, подтверждается лабораторными исследованиями и производственной проверкой. Ускоренные испытания, проведенные на стенде с использованием топлива, загрязненного абразивом, показали, что износостойкость опытных плунжерных пар по основным показателям в 2–2,5 раза выше аналогичных показателей серийных изделий, изготовленных из стали ХВГ.

Результаты эксплуатационных испытаний на тракторах ДТ-75М показали, что после наработки 3200...3500 мото-часов на деталях опытных плунжерных пар видны только следы приработки (матовые сопрягаемые поверхности) и отсутствуют износы. В то же время на деталях серийных плунжерных пар из стали ХВГ после такой же наработки обнаружены износы от 1,5 до 2,5 мкм и местные задиры.

Заключение. Плунжеры и втулки топливных насосов из недорогой стали 18ХГТ после нитроцементации в высокоактивном карбюризаторе могут заменить аналогичные детали из дорогой и дефицитной инструментальной стали ХВГ. При массовом производстве плунжерных пар затраты на внедрение дополнительной операции – нитроцементации могут быстро окупиться благодаря невысокой стоимости стали 18ХГТ и повышению износостойкости изделий более чем в 2 раза.

Владимир Николаевич Гадалов, д-р техн. наук;
Владимир Романович Петренко, д-р техн. наук;
Юлия Владимировна Скрипкина, канд. техн. наук,
julia_skr@mail.ru;
Татьяна Николаевна Розина;
Роман Владимирович Бобрышев;
Юрий Викторович Болдырев, канд. техн. наук

МАРОЧНИК СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ. **3-е изд.**

А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.

Под ред. **А.С. Зубченко**

2011. – 784 с. ISBN 978-5-94275-582-9 **Цена 4180 р.**

Содержит около 600 марок сталей и сплавов черных металлов. Для каждой марки указаны назначение, химический состав, механические свойства в зависимости от состояния поставки, температуры, режимов термообработки, поперечного сечения заготовок, места и направления вырезки образца, описан комплекс технологических свойств. Приведены системы маркировки сталей по Евронормам и национальным стандартам. В приложениях даны физические свойства; механические свойства в зависимости от температур отпуска, испытания, ковочных; жаропрочные свойства; марки, характеристики и области применения электротехнических и транспортных сталей; зарубежные материалы, близкие по химическому составу к отечественным; перевод твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и Шору; соответствие различных шкал температур.

Для конструкторов, технологов, металловедов, исследователей и других специалистов всех отраслей машиностроения, полезен преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.983

Э.А. Назарян, М.М. Аракелян *(Ереванский государственный университет),*
В.В. Морозов *(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)*

Оптимизация процесса формоизменения листового молибдена для выращивания монокристаллов

На основе результатов экспериментальных исследований проведена оптимизация процесса вытяжки контейнеров в форме лодочки из листового молибдена, применяемых для выращивания монокристаллов методом горизонтально направленной кристаллизации. Разработана технологическая оснастка для практической реализации предложенной технологии.

Ключевые слова: листовой молибден; контейнер; деформация; напряжение; монокристалл.

On the basis of results of experimental studies the optimization of the drawing of containers, which have boat form, made of sheet molybdenum, used for growing of single crystals by horizontal directed crystallization method is carried out. The technological equipment for practical implementation of the proposed technology is developed.

Keywords: sheet molybdenum; container; strain; stress; single crystals.

Одной из особенностей развития современных технологий является резкое повышение требований к служебным характеристикам используемых материалов. К таким материалам относится листовой молибден, применяемый в качестве конструкционного материала в процессах роста оптически прозрачных тугоплавких монокристаллов из расплава методом *горизонтально направленной кристаллизации* (ГНК) [1].

Оптимизация технологии роста тугоплавких монокристаллов возможна на основе изучения процессов, сопровождающих плавление и кристаллизацию вещества: физической кинетики на фронте роста, процессов тепло- и массопереноса в расплаве и кристалле, а также процессов, происходящих в монокристалле при его охлаждении. Отсутствие надежных знаний о закономерностях, происходящих в указанных процессах, вынуждает специалистов искать альтернативные пути оптимизации.

Сущность метода ГНК изложена в работе [1], где показано, что для выращивания монокристаллов с заданными оптическими свойствами особое значение приобретает форма и технология изготовления контейнеров в связи с тем, что происходящие процессы во многом обусловлены тепло- и массопереносом между контейнером и расплавом.

Существующие конструкция и технология изготовления контейнеров, основанные на изгибе листового молибдена с применением пламенного нагрева, имеют ряд недостатков [2], препятствуют образованию требуемого фронта кристаллизации и получению высококачественных монокристаллов (рис. 1). Поэтому оптимизация конструкции контейнеров, разработка современной технологии и технологической оснастки для ее практической реализации, свободных от недостатков, являются актуальными научно-техническими задачами.

Молибденовые контейнеры относятся к тонкостенным неосесимметричным изделиям, основным технологическим процессом изготовления которых является глубокая вытяжка. Однако причины физического и технологического характера не позволяют применять традиционные методы для формоизменения листового молибдена.

В настоящей статье, являющейся продолжением [2, 3], на основе результатов экспериментальных ис-

Рис. 1. Существующая конструкция контейнера

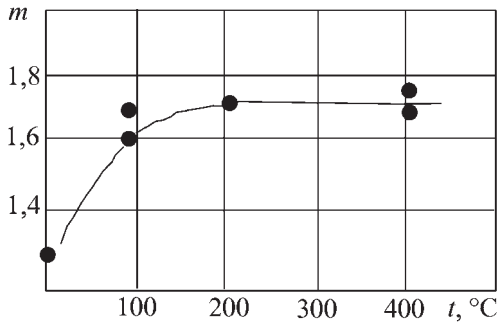


Рис. 2. Зависимость предельной степени деформации *m* от температуры *t*

следований по определению деформационных и технологических характеристик листового молибдена, предложена оптимальная форма контейнера и разработана технологическая оснастка для ее практической реализации.

Экспериментальные исследования проводили в три этапа.

На первом этапе определяли параметры, характеризующие механические свойства листового молибдена: предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности $\sigma_в$ и относительное удлинение δ. По результатам испытаний стандартных образцов установлено, что $\sigma_{0,2}$ = 570 Н/мм^2, $\sigma_в$ = 680 Н/мм^2 и $\delta \approx 10$ %. По данным эксперимента строили графики зависимости истинных напряжений σ_i от истинных деформаций ε_i, линейный характер которых в логарифмических координатах позволил аппроксимировать зависимость σ_i (ε_i) степенной функцией

$$\sigma_i = A\,\varepsilon_i^n\,, \qquad (1)$$

где A и n – параметры деформационного упрочнения [3]:

$$A = \sigma_в\, e^n\, n^{-n}\,; \quad n = \ln(1+\delta); \qquad (2)$$
$$(A = 935\ \text{Н/мм}^2;\quad n = 0{,}095)\,.$$

Зависимости (1) и (2) могут быть использованы в теоретическом анализе различных процессов формоизменения листового молибдена, в которых ставится задача определения полей напряжений и деформаций с учетом деформационного упрочнения.

Однако на основе экспериментов на одноосное растяжение не представляется возможным судить о комплексных технологических свойствах листового молибдена, так как реальные процессы формоизменения в отличие от одноосного растяжения протекают в достаточно сложных нестационарных условиях. Поэтому был проведен второй этап экспериментов по глубокой вытяжке цилиндрических изделий на специально разработанном устройстве с дифференциальным нагревом [3].

Исследования показали, что предельная степень деформации зависит как от температурно-скоростных режимов деформирования, так и от условий трения и

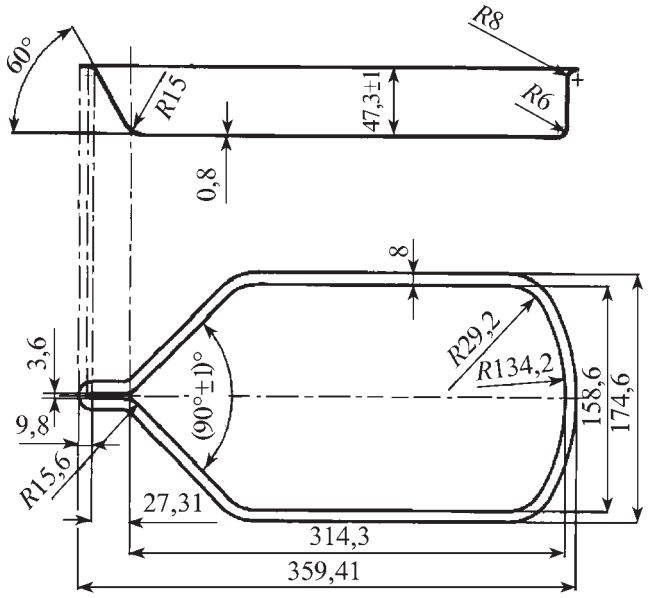


Рис. 3. Оптимальная конструкция контейнера для глубокой вытяжки

силы прижима. Установлено, что при прочих равных условиях предельная степень деформации существенно увеличивается при обеспечении определенного градиента температур деформирующих инструментов: около 200 °С на внешнем контуре заготовки и 20 °С – на пуансоне (рис. 2). Увеличение предельной степени деформаций при дифференциальном нагреве объясняется тем, что при сохранении достаточной прочности в опасном сечении заготовки в процессе вытяжки снижается сопротивление деформированию плоской части фланца [4].

Для проведения третьего этапа экспериментальных исследований была разработана технологическая оснастка для формоизменения – вытяжки оптимальной заготовки из листового молибдена. С этой целью была предложена конструкция оптимального контейнера-лодочки, удовлетворяющая одновременно требованиям процесса роста и условиям формоизменения (рис. 3).

На рис. 4 представлен общий вид устройства для глубокой вытяжки контейнеров, а на рис. 5 – контейнер с размерами 160×315×50 мм, изготовленный из листового молибдена толщиной 0,7 мм.

При разработке устройства для глубокой вытяжки контейнеров были решены следующие задачи конструктивного характера:

• в процессе глубокой вытяжки исключена возможность возникновения растягивающих напряжений на радиусных кромках деформирующих инструментов путем приложения сжимающих нагрузок на наружный контур молибденового контейнера;

• путем выноса прижимного устройства из зоны нагрева обеспечены минимальная высота для фигурного пуансона, работоспособность упругих элементов,

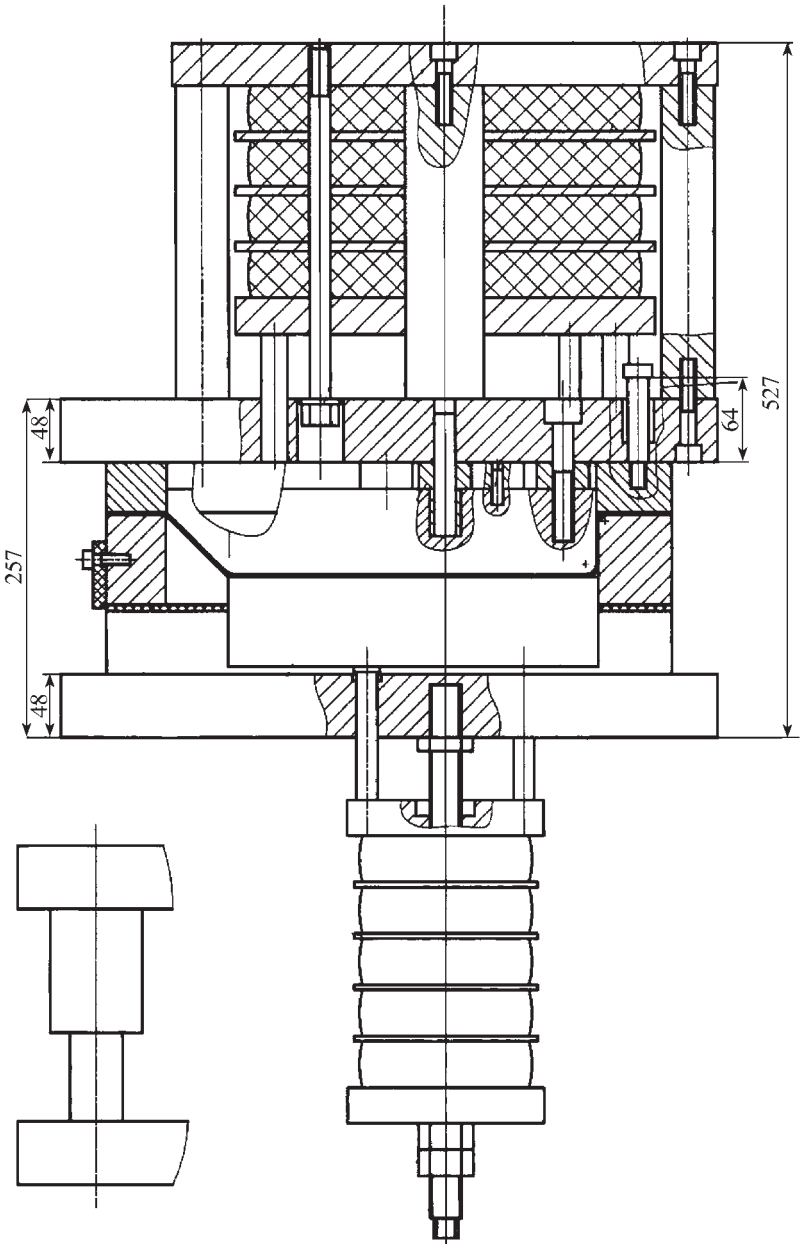


Рис. 4. Общий вид технологической оснастки

а также создание необходимой сжимающей силы для исключения гофрообразования.

Исходя из сложности формы контейнера, для обеспечения равномерного зазора между деформирующими инструментами применяли узлы с шариковыми направляющими.

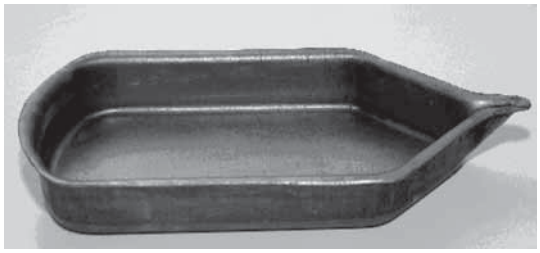


Рис. 5. Контейнер, изготовленный глубокой вытяжкой

Выводы

1. На основе испытаний плоских образцов на одноосное растяжение определены механические свойства листового молибдена и показано, что деформационные характеристики описываются степенной зависимостью.

2. Установлено, что для увеличения допустимых степеней деформаций целесообразно применение дифференциального нагрева.

3. Разработаны и реализованы на практике устройство и современная технология вытяжки контейнеров-лодочек, обеспечивающих выращивание высококачественных монокристаллов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Багдасаров Х.С.** Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004. 160 с.

2. **Назарян Э.А., Аракелян М.М.** Глубокая вытяжка молибденовых контейнеров для выращивания монокристаллов // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 8. С. 25–27.

3. **Назарян Э.А., Аракелян М.М.** О технологических свойствах листового молибдена // Известия Национальной академии наук Республики Армения. Сер. технических наук. 2003. № 1. Т. LVI. С. 36–39.

4. **Назарян Э.А., Константинов В.Ф.** Кинематика деформирования в формоизменяющих операциях листовой штамповки // Вестник машиностроения. 1999. № 2. С. 35–42.

Эрнест Агаджанович Назарян, д-р техн. наук,
enazaryan@ysu.am;
Милета Мартиросовна Аракелян,
канд. физ.-мат. наук;
Валентин Васильевич Морозов, д-р техн. наук

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 14.06.2012 г. Подписано в печать 26.07.2012 г. Формат 60×88 1/8.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 7,11. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.

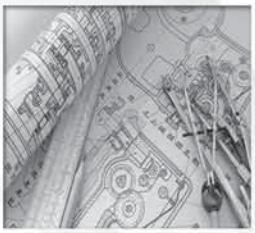
ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

учебное пособие в 4 кн. Под ред. **Д.В. Чернилевского**

2012 г. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-602-4

Цена за комплект из 4 книг 1000 р.

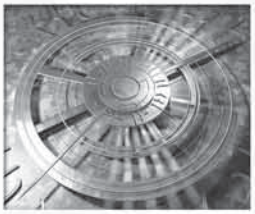


Кн. 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА. Н.В. Ладогубец, Э.В. Лузик

Содержит основные положения, формулы и законы, используемые при изучении курса "Теоретическая механика", включая динамику материальной точки и динамику материальной системы и твердого тела. Даны алгоритмы решения задач, вопросы для самоконтроля и тестовые задания.

Кн. 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. В.В. Астанин

Изложены основные вопросы расчетов на прочность элементов машин и сооружений. Приведены примеры решения типовых задач на растяжение и сжатие, сдвиг, кручение, изгиб, сложное сопротивление, повторно-переменные и динамические нагрузки.



Кн. 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН. Я.Т. Киницкий

Изложены основные понятия и определения курса, структура и классификация механизмов и машин, общие методы кинематического и динамического исследования механизмов, приведены некоторые сведения из теории регулирования движения машин и уравновешивания механизмов.

Кн. 4. ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. Д.В. Чернилевский

Изложены основные сведения о технологических функциях механизмов, их кинематических и силовых возможностях, достоинствах и недостатках, позволяющих технологу производственных процессов провести анализ и синтез при принятии решения в процессе разработки технического задания на совершенствование существующих конструкций машин или вновь проектируемых машинных комплексов.

Для студентов высших технических учебных заведений, изучающих курсы "Сопротивление материалов" и "Техническая и прикладная механика".

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU