ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Издается с января 2003 г.

Том 17 № 12 декабрь 2019

Председатель редакционного совета и главный редактор
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., д.т.н., доц.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А., д.т.н., проф.
КОЛЕСНИКОВ А.Г., д.т.н., проф.

Зам. главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОТЕНОК В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф.
ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц.
МОНАСТЫРСКИЙ В.П., д.т.н.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ФИГУРОВСКИЙ Д.К., к.т.н., доц.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ОЛУНД Э., Dr. Ir.
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
СЕРИКОВА Е.А.
ОРЛОВА А.В.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63952 от 09.12.2015

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Кукарцев В.А., Капошко И.А., Кукарцев А.В. Технология производства синтетического чугуна, обеспечивающая эффективность изготовления отливок 531
Шапарев А.В., Савин И.А. Влияние содержания кислорода в технологическом газе на качество и скорость лазерной резки листовых заготовок из малоуглеродистых сталей 535

Кузнечно-штамповочное производство

Семёнов И.Е. Экспериментально-аналитическое определение характеристик армированных полиуретанов 540
Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Экспериментальная проверка возможностей холодной объемной штамповки стаканов из конструкционных сталей 545

Прокатно-волочильное производство

Соколова О.В., Моисеев А.А., Лепестов А.Е. Компьютерное моделирование валковой формовки труб 553
Поворов С.В., Егоров Д.В., Волгин Д.С. Производство специального профиля из листовой заготовки методом формовки в роликах для изготовления наборных теплообменных панелей 557

Материаловедение и новые материалы

Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Шатульский А.А., Клементьев Д.С. Исследование микроструктуры и механических свойств коррозионно-стойких биметаллов, полученных методом непрерывной разливки 562

Информация

Колесников А.Г. К 70-летию кафедры "Оборудование и технологии прокатки" МГТУ им. Н.Э. Баумана. История одного портрета 571
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2019 г. 574

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением; 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности; 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.04 — Литейное производство; 05.16.05 — Обработка металлов давлением; 05.16.06 — Порошковая металлургия и композиционные материалы; 05.16.08 — Нанотехнологии и наноматериалы и в базу данных Chemical Abstracts

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 "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2019

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Published since 2003, January

Vol. 17 № 12 December 2019

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
LAVRINENKO V.Yu.

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee
BLANTER M.S.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
KUKHAR' V.D.
LARIN S.N.
MONASTYRSKY V.P.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
NURALIEV F.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
TREGUBOV V.I.
FIGUROVSKY D.K.
SHATUL'SKY A.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
ÖHLUND E.
TUTMANN T.

This issue prepared with assistance of specialists:
SERIKOVA E.A.
ORLOVA A.V.

Journal is registered by Roskomnadzor.
The certificate of registration ПИ № ФС 77-63952, December 9, 2015.

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 united catalogue "Pressa Rossi" **39205**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Kukartsev V.A., Kaposhko I.A., Kukartsev A.V. Synthetic cast iron production technology inducing efficiency of castings making 531
Shaparev A.V., Savin I.A. Effect of oxygen content in technological gas on quality and speed of laser cutting of sheet blanks from low-carbon steels 535

Forging and Stamping Production

Semenov I.E. Experimental and analytical characterization of reinforced polyurethanes 540
Dmitriev A.M., Korobova N.V. Experimental verification of cold forging capabilities of cups from structural steels 545

Rolling and Drawing Production

Sokolova O.V., Moiseev A.A., Lepestov A.E. Computer simulation of pipes roll forming 553
Povorov S.V., Egorov D.V., Volgin D.S. Special shape production of sheet blank by roll forming to heat-exchange panels production 557

Physical Metallurgy and New Materials

Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Shatul'sky A.A., Klement'yev D.S. Study of microstructure and mechanical properties of corrosion-resistant bimetals obtained by continuous casting 562

Information

Kolesnikov A.G. To 70th anniversary of department "Equipment and rolling technologies" Bauman Moscow State Technical University. Story of one portrait 571
Index of articles published in year 2019 574

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.09 — technologies and forming machines; 05.02.10 — welding, related processes and technologies; 05.04.11 — nuclear reactor engineering, machines, units and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 — physical metallurgy and heat treatment of metals and alloys; 05.16.04 — foundry; 05.16.05 — plastic metal forming; 05.16.06 — powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 — nanotechnologies and in Chemical Abstracts database

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

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2019

УДК 621.74.011

В.А. Кукарцев, И.А. Капошко
(Сибирский федеральный университет, г. Красноярск),
А.В. Кукарцев
(Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск)

Технология производства синтетического чугуна, обеспечивающая эффективность изготовления отливок

Рассмотрена сложившаяся ситуация в литейном производстве России, связанная с отсутствием чугунного лома и высокими затратами на использование литейных чугунов. Разработаны технология выплавки синтетического чугуна из стального лома, а также новый состав футеровки, позволяющий выдерживать необходимый температурный режим плавки при использовании этой технологии. Приведен расчет экономической эффективности на основе затрат на шихтовые материалы.

Ключевые слова: синтетический чугун; металлозавалка; кислая футеровка; индукционная тигельная печь; эффективность производства; стойкость футеровки; простои; стоимость отливок; технология плавки.

The current situation in the foundry of Russia related to the absence of cast iron scrap and high costs for the use of cast iron is considered. The technology of smelting synthetic cast iron from steel scrap and new lining composition to withstand the required melting temperature with this technology are developed. The calculation of economic efficiency on the basis of costs for charge materials is given.

Keywords: synthetic cast iron; metal charge; acid bottom and lining; coreless induction furnace; production effectiveness; lining life; shutdown; casting value; foundry casting work.

Основным фактором, определяющим содержание стратегий развития современного литейного предприятия, является применение современных технологических процессов, особенно технологии плавки. В первую очередь это относится к производству чугунных отливок, составляющих 65 % от массы всех сплавов.

Постоянное улучшение физических и механических свойств литейных сплавов, усовершенствование старых и введение новых процессов, позволяющих получать точное литье с гладкой поверхностью, не требующей механической обработки, и, наконец, постоянный рост производительности применяемых процессов изменяют не только технологический, но и экономический профиль современного литейного производства [1].

На сегодняшний день чугун — самый распространенный литейный сплав (рис. 1, *а*). Наиболее потребляемым чугуном является серый чугун, для выплавки которого используются различные плавильные печи (рис. 1, *б*).

Индукционная плавильная печь относится к основным производственным фондам предприятия и оказывает непосредственное влияние на производительность труда и, следовательно, на прибыльность. По этой причине она является основным фактором, определяющим содержание стратегий развития предприятия в целом. Увеличение надежности ее работы — одна из основных задач воспроизводства основных производственных фондов [2].

Индукционная плавильная печь обладает высокой производительностью при выплавке сплавов, высокой стойкостью кислой футеровки, энергоэффективностью и оптимизацией затрат на обслуживание. Ее использование позволяет осуществлять более детальную термовременную

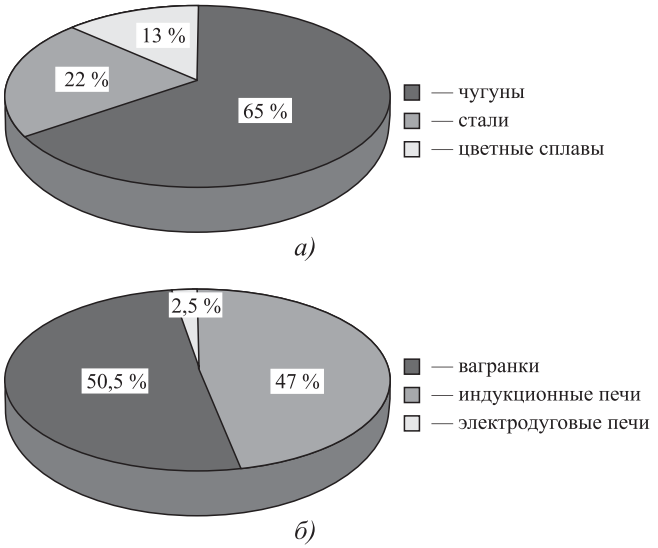


Рис. 1. Объем выплавляемых литейных сплавов (*а*) и использование плавильных печей для получения отливок из чугуна (*б*)

обработку, рафинирование, модифицирование и легирование жидкого металла. Преимуществом индукционных печей является повышенная технологическая гибкость: можно получать чугун любого химического состава, выпускать жидкий металл произвольными порциями, долговременно хранить металл без изменения его свойств, использовать шихтовые материалы малой объемной массы и механизировать процессы плавки.

Первый блок цехов с индукционными печами промышленной частоты вместо вагранок в нашей стране начал работать в 1963 г. на Каунасском чугунолитейном заводе. Институт "Ленгипротяжмаш" в течение ряда лет в проектах литейных цехов предусматривал индукционные печи промышленной частоты для выплавки синтетических чугунов. Начальным сырьем для производства синтетического чугуна служили стальной лом, листовая обрезь, стружка и другие бюджетные металлоотходы. Они обеспечивают эффективное использование металлоотходов малого объемного веса.

Преимуществом данной технологии является возможность реализовать переплавку отходов на месте их образования. Использование дешевых металлоотходов обеспечивает снижение себестоимости синтетического чугуна на 25...39 % по сравнению с чугунами вторичного переплава [3]. Обслуживающий персонал ограничен от воздействия тепла, пыли, шума, газов, присутствующих при сжигании топлива, следовательно, улучшаются санитарно-гигиенические условия его труда. При работе индукционных печей воздушный бассейн засоряется во много раз меньше, чем при ваграночном процессе, при котором требуются громоздкие, дорогостоящие средства очистки, что дает большое преимущество, если предприятие находится в черте города. Помимо этого, снижается удельный расход огнеупорных материалов — для индукционной печи он составляет 3 кг/т, для дуговой печи с кислой футеровкой — 17,6 кг/т и для вагранки — 27 кг/т [4].

В традиционной металлозавалке при выплавке синтетического чугуна в печах ИЧТ (рис. 2) доля стального лома составляет 25...30 %, что соответствует ведению плавки при $t \leqslant 1450$ °С. Годы эксплуатации доказали преимущества этих печей: надежность конструкции; простота обслуживания и ремонта; возможность (в случае производственной необходимости) ведения процесса плавки одним плавильщиком при установке двух печей с совмещенной площадкой обслуживания; выравнивание температуры и химического состава расплава, его активное взаимодействие со шлаком за счет циркуляции.

С 2000 годов чугунного лома не стало в связи с его активной продажей за рубеж, стоимость передельных и литейных чугунов резко увеличилась, возросли затраты на их доставку. Это привело к удорожанию при производстве чугунных отливок из-за повышения стоимости шихтовых материалов. Возникли проблемы использования кислой футеровки, как наиболее дешевой и обладающей высокой стойкостью, так как в составе металлозавалки стали использовать увеличенное количество стального лома и по этой причине поднимать температуру плавки выше 1450 °С.

Практика показала, что температура выплавки синтетического чугуна 1500...1550 °С приводит к снижению стойкости футеровки

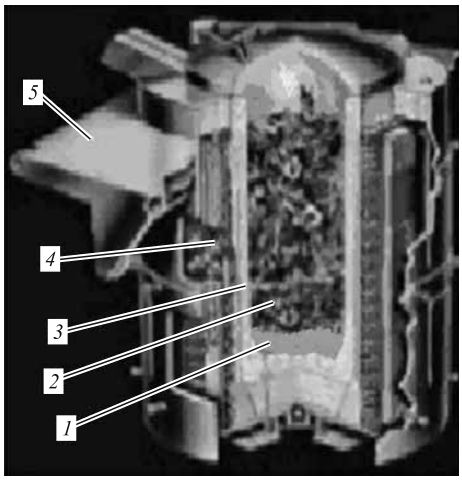


Рис. 2. Индукционная тигельная печь с металлозавалкой: *1* — зумпф (жидкий остаток); *2* — металлозавалка; *3* — футеровка; *4* — индуктор; *5* — корпус печи

с 300...350 до 180...200 плавок. Это снижает эффективность производства из-за вынужденных простоев, связанных с перефутеровкой печи, и увеличения затрат на материалы и электроэнергию [5]. Длительность процесса перефутеровки (от начала остановки печи до первого полноценного слива готового расплава) печи ИЧТ-1 составляет от 2,5 до 3 суток. В условиях современной экономики для повышения конкурентоспособности готовых изделий требуется получать одновременно недорогие и качественные заготовки при низком уровне брака [6].

На стоимость отливок влияет выбранный плавильный агрегат и материалы, применяемые для его футеровки. Кислая футеровка на основе кварцита обладает высокой стойкостью, если в ней (после спекания) образовалось три зоны — спеченная, полуспеченная и сыпучая (рис. 3), но при температуре выше 1450 °С процесс перехода одной зоны в другую происходит гораздо быстрее, что ускоряет процесс ее износа [7].

Для улучшения свойств кислой футеровки предпринимали неоднократные попытки применения добавок из смеси оксидов кальция, железа, натрия, фосфорсодержащих добавок, специальной фритты, сплавленной из смеси кремнезема и оксида натрия или кремнезема с оксидами железа и кальция, тридимитовой затравки в виде тонкого помола тридимитизированного динаса или добавки 30 % корунда, а также высокотемпературных добавок в виде ZrO_2, Cr_2O_3, хромоглиноземистого шлака, хромита. Однако все они не нашли промышленного применения.

Надежным решением проблемы является высокотемпературная технология выплавки синтетических чугунов в печах ИЧТ при 1500...1600 °С [8]. Она позволяет снизить расходы материалов и электроэнергии за счет применения дешевого стального лома вместо литейных чугунов, сохранить стойкость футеровки (300 плавок), оказаться от высокотемпературных печей для термической обработки исходного кварцита и жаростойкой тары. Эта технология основана на применении нового состава кислой футеровки. Ее внедрение позволяет повысить эффективность выплавки синтетического чугуна и получить экономию затрат на приобретение шихтовых и футеровочных материалов. Результаты расчета экономии затрат шихтовых материалов для плавильной печи ИЧТ-1 представлены в таблице.

Исходными данными для расчета являются:

1) число плавок в смену — 3 (по 700 кг для традиционной технологии и 900 кг для высокотемпературной);

2) непрерывный график работы;

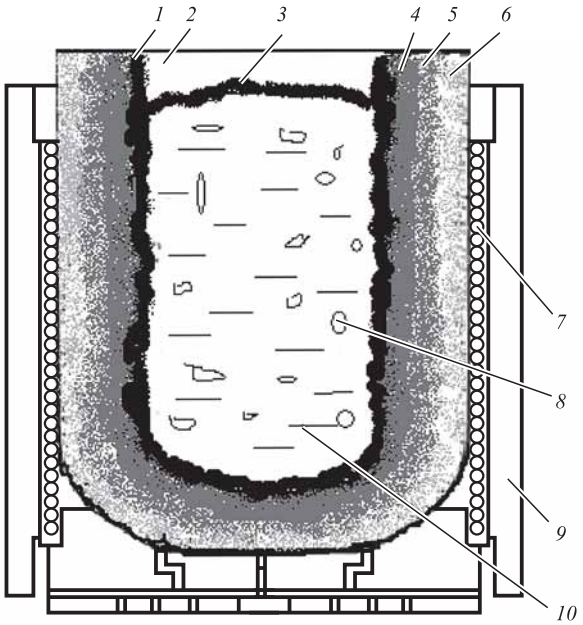


Рис. 3. Схема расположения зон кварцитовой футеровки в печи ИЧТ:

1 — ошлакованная спеченная корочка футеровки; *2* — газовая фаза печи; *3* — жидкий шлак на поверхности расплава; *4* — спеченная зона футеровки; *5* — полуспеченная зона футеровки; *6* — зона неспекшейся массы (буферная); *7* — индуктор печи; *8* — газ в расплаве; *9* — корпус печи; *10* — расплав

3) стойкость футеровки — 300 плавок;

4) необходимая масса исходных материалов для выполнения одной футеровки — 600 кг;

5) рыночная стоимость отливок из серого чугуна — 75...86 руб./кг.

В итоге экономия затрат составила 34 335,14 − 13 392,92 (43 957,64 − 13 717,93) = = 20 942,22/30 239,71 руб. за 1 т жидкого чугуна или затраты снижаются на 61...68,8 %.

Использование новой технологии позволяет применять низкотемпературные нагревательные печи, снижая производственные затраты, особенно расход электроэнергии и замену нержавеющей стали (10Х23Н18) на углеродистую, применяемую для изготовления тары для сушки кварцита. Стоимость листа из нержавеющей стали в 3—5 раз дороже, чем из углеродистой, расход электроэнергии на 1 т садки в печи СДО 15.15.10/12, обеспечивающей нагрев кварцита до температуры 900 °С, в 3 раза выше, чем у печи СДОС 10.12,5.10/2,5ИЗ для нагрева этой же садки до температуры 200 °С.

На сегодняшний день основная масса литейных производств — это небольшие литейные цеха с объемом выпуска 2...5 тыс. т годных отливок в год. Они оснащены не менее чем двумя плавильными печами, которые позволяют быстро реагировать на потребности рынка в отливках из раз-

Результаты расчета экономии затрат шихтовых материалов для плавильной печи ИЧТ-1

Материал	Изображение материала	Рыночная стоимость, руб./кг	Расход, кг/руб., на 1 т жидкого чугуна	
			Традиционная технология	Высокотемпературная технология
Зумпф (жидкий остаток)		50 % от отливки	300...350/12 000...14 000	100/4000
Возврат производства		80 % от отливки	220...280/14 080...17 920	—
Литейный чугун и чугунный лом		25...40	170...200/4250...8000	—
Ферромарганец, ферросилиций		48...54	5...10/250...500	10...15/500...750
Стальной лом		9...12	300...350/3000...3500	885...890/8850...8900
Науглероживатель		2...3	5...6/12,5...15	10...20/25...50
Кварцит		7...9	2,83/22,64	1,9/15,2
Электрокорунд		32...35	—	0,08/2,72
		Общие затраты, руб.	34 335,14...43 957,64	13 392,92...13 717,93

личных сплавов. Две печи ИЧТ-1 позволяют изготовлять не менее 5000 т отливок из серого чугуна.

Использование высокотемпературной технологии выплавки синтетического чугуна позволяет на 60 % увеличить мощности за счет повышения эффективности работы плавильного оборудования. По этой технологии можно изготовлять и стальные отливки [9]. Снижение затрат на материалы, используемые в металлозавалке, способствует уменьшению себестоимости выпускаемой продукции и повышает эффективность литейного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Enhanced** Quality in Electric Melt Grey Cast Irons / Iulian Riposan, Mihai Chisamera // StelianStan 2017 ISIJ International. 2013. Vol. 53. No. 10. P. 1683—1695.

2. **Кукарцев В.В., Антамошкин О.А.** Комбинированный метод принятия решений по воспроизводству основных производственных фондов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. Вып. 2. С. 56—60.

3. **Futas P., Pribulova A., Petrik, J. et al.** The study of synthetic cast iron quality made from steel scrap // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2018. No. 18. P. 215—222.

4. **Левкина О.Ю. и др.** Модель эффективного управления литейным производством авиастроительного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4—2. С. 454—462.

5. **Dey AK (Dey Asit Kr).** Energy Efficiency Model for Induction Furnace // Proceedings Paper. 2018. No. 302. P. 1—3.

6. **Kukartsev V.A., Kukartsev V.V., Kukartsev A.V.** Effect of the Temperature Treatment of Quartzite on the Lining Resistance of Commercial-Frequency Induction Crucible Furnaces // Refractories and Industrial Ceramics. 2018. No. 3. P. 252—256.

7. **Kukartsev V.A., Trunova A.I., Kukartsev A.V.** Thermal Analysis of Quartzite Used to Line a Crucible-Equipped Industrial-Frequency Induction Furnace // Refractories and Industrial Ceramics. September 2014. Iss. 3. Vol. 55. P. 220—222.

8. **Kukartsev V.A., Sazonov A.M., Babkin V.G.** Effect of the Addition of Electrocorundum on Structural-Phase Transformations in the Quartz Lining of an Industrial-Frequency Crucible-Type Induction Furnace // Refractories and Industrial Ceramics. July 2015. Iss. 2. Vol. 56. P. 151—154.

9. **Steelmaking** based on inductive melting / Mohamed Chaabet, Erwin Dötsch // Heat processing. 2012. Vol. 10. No. 1. P. 49—58.

Виктор Алексеевич Кукарцев, канд. техн. наук,
sarabernar777@mail.ru;
Инга Анатольевна Капошко;
Анатолий Викторович Кукарцев, канд. экон. наук

УДК 621.7.01

А.В. Шапарев, И.А. Савин
(Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ)

Влияние содержания кислорода в технологическом газе на качество и скорость лазерной резки листовых заготовок из малоуглеродистых сталей

Экспериментально исследовано влияние содержания кислорода во вспомогательном технологическом газе на скорость лазерной резки и качество поверхности зоны обрезки. Использованы вспомогательные технологические газы "ЛАЗАЛ 2003", производимые ООО "Эр Ликид" (содержание кислорода 99,95 %), и "Энерго" (содержание кислорода 99,7 %), низкоуглеродистая сталь 20ГЮТ толщинами 8 и 3 мм. Цель исследования — увеличение производительности лазерного оборудования за счет повышения скорости резания. Установлено, что использование кислорода при лазерной резке в качестве вспомогательного газа позволяет увеличить скорость резания, уменьшить мощность лазерной установки или увеличить толщину разрезаемого металла при той же мощности.

Ключевые слова: лазерная резка; кислород; дефекты резки; производительность резки; качество резки.

The effect of the oxygen content in the auxiliary process gas on the laser cutting rate and the quality of the cut-off zone surface is experimentally studied. The auxiliary technological gases: "LAZAL 2003" produced by Air Liquide (99.95 % oxygen) and "Energo" (99.7 % oxygen) low-carbon steel 20GYuT with 8 and 3 mm thickness are used, for research. The goal of the study is to increase the productivity of laser equipment by increasing the cutting rate. It is established that the use of oxygen in laser cutting as auxiliary gas makes it possible to increase the cutting rate, to decrease the power of the laser installation, or to increase the thickness of the cut metal at the same power.

Keywords: laser cutting; oxygen; cutting defects; cutting rate; cutting quality.

Введение. При лазерной резке стальных листов с использованием кислорода в качестве вспомогательного газа лазерный луч расплавляет металл в зоне реза, а вдуваемый с большой скоростью кислород сначала окисляет (сжигает) расплав, а затем уносит его из разреза. При этом происходит частичное испарение расплава из зоны реза. Кислород, попадая в зону реза, расплавленную лазерным лучом, вступает с металлом в реакцию окисления, сопровождающуюся выделением теплоты. Это приводит к повышению температуры в зоне реза, в результате увеличиваются скорость резки и ширина реза. Кислород в качестве вспомогательного газа предпочтительно применять для резки низкоуглеродистой и среднеуглеродистой сталей. Если далее необходима окраска вырезанной детали, то необходимо удалить окисную пленку из зоны среза.

Установлено, что при использовании кислорода при увеличении толщины металла для предотвращения интенсификации экзотермических реакций давление кислорода следует уменьшать, так как процесс горения расплава может выйти из-под контроля и в результате образуется брак [1].

Скорость процесса лазерной резки зависит от чистоты используемого кислорода. По данным фирмы Linde group, степень очистки кислорода, используемого в качестве вспомогательного газа при лазерной резке, должна составлять 99,99...99,96 % [2]. При меньшей степени очистки скорость резания существенно снижается. Зависимость скорости резания от чистоты кислорода, полученная резанием стали толщиной 2 мм с использованием лазера мощностью 800 Вт и давлением газа 250 кПа, показана на рис. 1.

Из графика на рис. 1 следует, что уменьшение чистоты кислорода с 99,9 до 99,5 % приводит к снижению скорости резания более чем на 1,5 м/мин. В условиях конкретного производства для получения оптимальных параметров реза необходимы дополнительные исследования.

Постановка задачи исследования. Увеличение числа используемого оборудования и

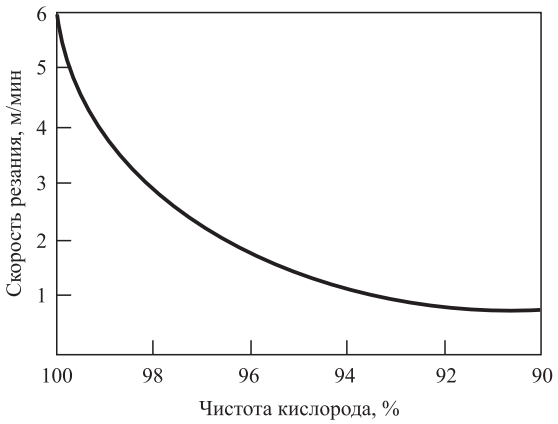


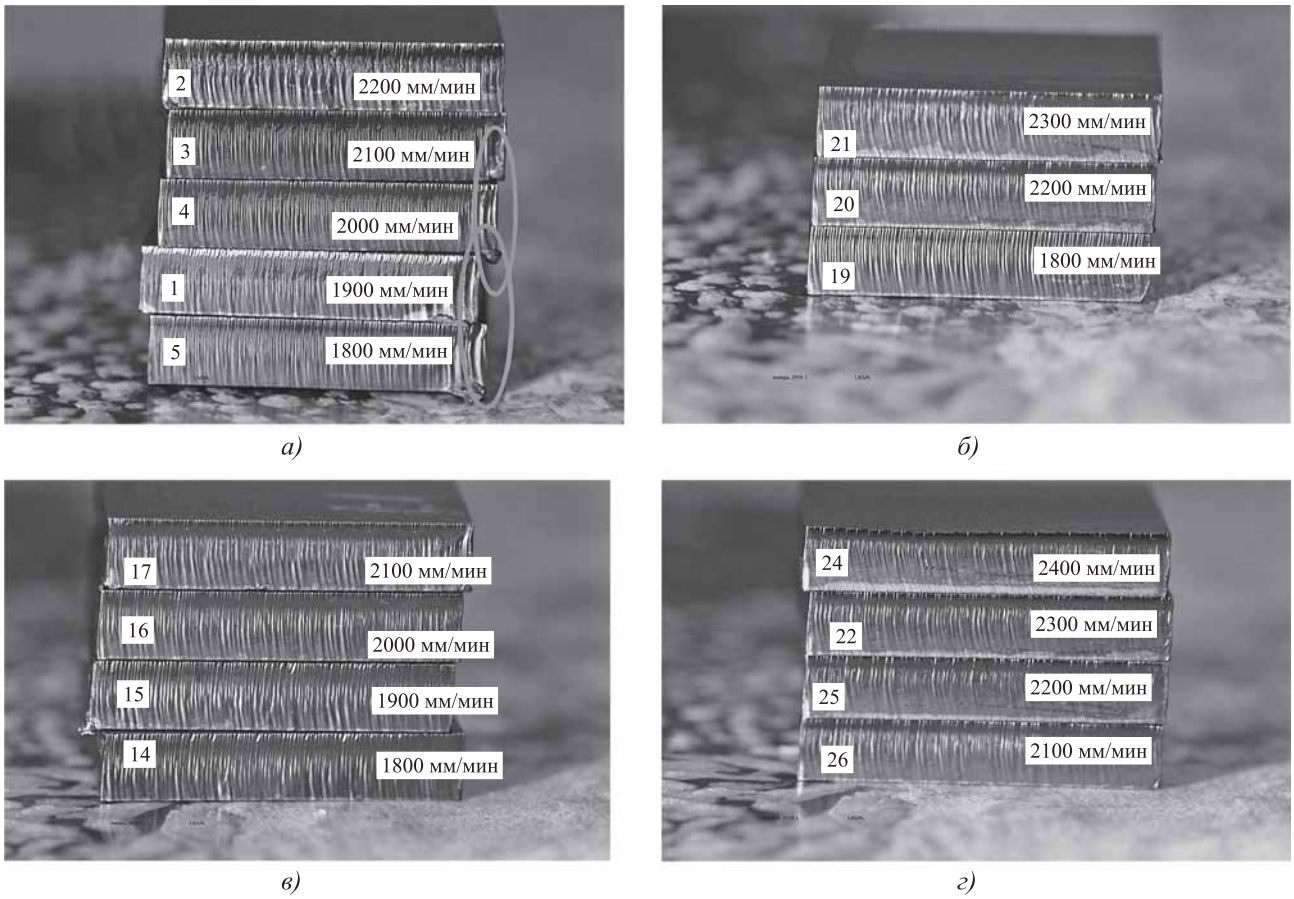
Рис. 1. Зависимость скорости резания от чистоты кислорода [1]

номенклатуры деталей для лазерной резки металлов на машиностроительных заводах требует тщательного подбора состава вспомогательных технологических газов. Наиболее часто на производстве в качестве вспомогательных газов используют азот, кислород, а также сжатый воздух.

Для определения влияния чистоты кислорода на параметры лазерной резки углеродистой стали толщинами 8 и 3 мм исследован процесс лазерной резки с использованием кислорода "ЛАЗАЛ 2003" производства ООО "Эр Ликид" (чистота 99,95 %) и кислорода "Энерго" (чистота 99,7 %). Главная задача исследования — повышение скорости лазерной резки и производительности лазерного оборудования [3].

Методика проведения эксперимента. Экспериментальную лазерную резку стали 20ГЮТ толщинами 8 и 3 мм осуществляли на установке лазерной резки TRU FLOW 3200. Для упрощения анализа результатов в качестве тестового контура был выбран квадрат 40×40 мм [4].

На первом этапе проводили резку со стандартными настройками, затем пошагово повышали скорость резки до момента появления непрорезанных участков. Затем заменяли кислород "Энерго" на кислород "ЛАЗАЛ 2003", осуществляли продувку газового тракта и повторяли процесс резки. Давление кислорода составляло 60 кПа. Результаты эксперимента представлены в таблице, а фотографии полученных образцов — на рис. 2.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Зоны реза при лазерной резке с использованием кислорода "Энерго" (99,7 %) (*а*, *б*) и "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %) (*в*, *г*): *а* — F = +5 мм, $d_с$ = 1,2 мм; *б* — F = +8 мм, $d_с$ = 1,4 мм; *в* — F = +5 мм, $d_с$ = 1,4 мм; *г* — F = +8 мм, $d_с$ = 1,4 мм

Результаты эксперимента лазерной резки стали 20ГЮТ толщинами 8 и 3 мм

Номер образца	Скорость резки, мм/мин		Фокусное расстояние F, мм	Диаметр сопла d_c, мм	Длина реза, мм		Повышение производительности лазерной резки, %
	Кислород "Энерго" (99,7 %)	Кислород "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %)			Кислород "Энерго" (99,7 %)	Кислород "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %)	
Толщина стали 8 мм							
1	1800	1900	+5	1,2	93 738	98 894	5,5
2	1900	2000					5,3
3	2000	2100					5,0
4	2100	2200					4,7
5	2200	2300					4,5
6	1800	2000	+5	1,4	93 738	98 894	11,1
7	1900	2100					10,5
8	2000	2200					10
9	2100	2300					9,5
10	2200	2400					9,1
11	1900	2100	+8	1,4	93 738	98 894	10,5
12	2000	2200					10
13	2100	2300					9,5
14	2200	2400					9,1
15	2300	2500					8,7
Толщина стали 3 мм							
1	2520	3000	+8	1,4	108 005	135 006	19,0
2	2890	3500					21,1
3	3270	4000					22,3
4	3650	4500					23,3
5	4000	5000					25,0

Анализ полученных результатов. При разработке технологических процессов лазерной резки следует учитывать возможность образования грата для ряда металлических материалов (наплывы на нижней кромке разрезаемого металла). Образование грата происходит в результате смачивания нижней поверхности твердого металла удаляемыми из полости реза жидким металлом и его оксидами за счет получения химических соединений, твердых и жидких растворов, диффузионных процессов в поверхностном слое металла [5, 6].

Наибольшее влияние на количество образующегося грата оказывают свойства рабочего газа и ширина реза. Применение кислорода и кислородосодержащих смесей позволяет резко уменьшить образование грата на кромках и облегчить его удаление с поверхности металла. Положительное влияние кислорода на качество кромки объясняется значительным уменьшением сил поверхностного натяжения при образовании расплава металла.

Кислород вызывает мощные экзотермические реакции, теплота которых помогает процессу. В кислороде можно резать довольно толстые листы углеродистых и низколегированных сталей.

Количество подаваемого кислорода должно точно регулироваться, иначе возможен выход реакции из-под контроля и, как следствие,

ухудшение качества реза и переход режима резки в неуправляемый автогенный режим.

Для улучшения качества лазерной резки стальных листов с использованием кислорода скорость резки не должна превышать суммарной скорости удаления жидкой фазы по всей поверхности фронта реза. Качество реза определяется избыточным давлением испарения жидкой фазы и ее горением в среде кислорода, подаваемого с высокой скоростью и высоким давлением.

Использование кислорода при лазерной резке в качестве вспомогательного газа позволяет уменьшить мощность лазерной установки или увеличить толщину разрезаемого металла при той же мощности.

Резка металлов толщиной 8 мм при использовании кислорода "Энерго" (99,7 %) является оптимальной при скорости резки 1800...1900 мм/мин. При скорости более 2000 мм/мин появляются частично непрорезанные участки. Данный скоростной режим не может быть рекомендован в производство.

Резка металлов толщиной 8 мм при использовании кислорода "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %) позволяет увеличить оптимальную скорость реза до 2000 мм/мин. При повышении скорости реза до 2100 мм/мин появляются непрорезанные участки, а при скорости 2300 мм/мин происходит образование грата. При увеличении фокусного расстояния до +7 мм и увеличении скорости до 2200 мм/мин на кромках реза образуется большое количество окалины и грата. Данный скоростной режим не может быть рекомендован в производство.

При фокусном расстоянии +4 мм и при использовании кислорода "Энерго" (99,7 %) на обратной стороне часто образуются капли расплава на углах, ухудшающие качество резки. Характерные дефекты отмечены на рис. 2, *а*. Увеличение фокуса до +8 мм снижает их количество для кислорода "Энерго" (99,7 %) (образцы № 2 и № 7) и практически устраняет для кислорода "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %) (образцы № 3 и № 5).

Визуальный качественный анализ показал, что кромка реза при использовании кислорода "Энерго" (99,7 %) является более шероховатой, чем при использовании кислорода "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %). Требуются дополнительные инструментальные измерения шероховатости для получения количественных данных.

Кислород является химически активным газом и при лазерной резке вступает в экзотермические реакции окисления железа. В результате экзотермические реакции добавляют почти 40 % энергии в зону резки и образуются оксиды с низкой вязкостью. Таким образом, кислород участвует не только в выдувании расплава, но и совместно с лазерным излучением участвует в процессе плавления. Как правило, при лазерной резке образуется около 97 % FeO; 2,9 % Fe_2O_3 и 0,1 % Fe_3O_4.

Дополнительная энергия при использовании кислорода и снижение вязкости расплава способствуют плавлению и вытеканию металла из зоны нагрева лазером, поэтому при резке кислородом надо внимательно относиться к установке давления газа, а также выбору мощности, скорости и уровню фокусировки лазерного излучения.

Чаще всего фокус лазерного излучения должен находиться на поверхности металла, что способствует высокой концентрации энергии на поверхности металла.

Аналогичные исследования по влиянию чистоты кислорода на скорость и качество лазерной резки различных металлов выполнены в ООО "Эр Ликид" во Франции. Результаты исследований показали, что чистота кислорода значительно влияет на скорость резки металлов толщиной выше 4 мм и на предельно возможную толщину разрезаемого металла. Чем чище кислород, тем более высокую скорость резки можно достичь при отсутствии грата и оптимальной шероховатости кромки, т.е. при той же мощности лазера и условиях фокусировки можно разрезать более толстый металл [2].

Аналогичные экспериментальные данные были предоставлены исследовательским европейским центром CTAS ООО "Эр Ликид". Исследовано влияние чистоты кислорода на максимальную скорость резки. Использованы также установки лазерной резки TRU FLOW 3200. Определяли максимальную скорость резки с наилучшими показателями по грату и шероховатости кромки. Допускалось изменение фокусировки на +/−1 мм. Толщины материала: 4, 6, 8 и 10 мм.

При постоянных параметрах газа заданной чистоты, фиксированных параметрах фокусировки и постоянной мощности лазера скорость резки увеличивали до появления грата на нижней стороне реза. В некоторых опытах грат удаляли фрезерованием [8, 9]. После

этого изменяли фокусировку лазера. Примеси в режущем кислороде, в частности, аргон, влияют на скорость и энергию реакции окисления и, как следствие — на скорость резки. При повышении чистоты кислорода от 99,7 до 99,95 % скорость резки увеличивается на 10 %. При использовании кислорода "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %) появляется возможность резки биметаллических материалов латунь—сталь—латунь без образования грата [10].

Заключение. Увеличение скорости резки при использовании кислорода "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %) приводит к повышению производительности лазерной установки, экономии кислорода и расходных материалов. Однако более высокая стоимость кислорода "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %) не позволит получить значительный экономический эффект.

Использование кислорода "ЛАЗАЛ 2003" (99,95 %) при лазерной резке материалов целесообразно:

1) при наличии высоких требований к кромке реза по показателям шероховатости и отсутствию дефектов в углах реза;

2) при необходимости повышения производительности лазерной резки за счет увеличения скорости резки;

3) при обработке углеродистых сталей толщиной от 8 мм и более, что позволяет использовать установки лазерной резки меньшей мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Резание** металлов излучением мощных волоконных лазеров / Е.Д. Вакс, И.Ф. Лебедкин, М.Н. Миленький и др. М.: Техносфера, 2016. 352 с.
2. **Введение** в лазерную резку материалов. Linde Group, 2004. 220 с.
3. **Степанова М.А.** Выбор кислорода для лазерной резки. https://mirprom.ru/public/vybor-kisloroda-dlya-lazernoy-rezki.html.
4. **Шапарев А.В., Савин И.А., Птичкин С.Н.** Производство кронштейнов грузовых автомобилей с использованием лазерных технологий. Курск: Университетская книга, 2018. 258 с.
5. **Shaparev A.V., Savin I.** Calculation of the Amount of the Reduction Required for the Formation of Compound Layers during Cold Rolling of Bimetals // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 328—333.
6. **Shaparev A.V., Savin I.A.** Calculation of Joint Plastic Deformation to Form Metal Compound in Cold Condition // Solid State Phenomena. 2017. 265. P. 313—318.
7. **Шапарев А.В., Савин И.А.** Совершенствование технологии производства биметаллических лент. Курск: Университетская книга, 2015. 241 с.
8. **Резание** материалов. Режущий инструмент / А.Г. Схиртладзе, В.А. Гречишников, Н.А. Чемборисов, С.Н. Григорьев, И.А. Савин. М.: Юрайт, 2016. 365 с.
9. **Savin I.A.** Determination of the effectiveness of the use of robotic systems in mechanical engineering // European Journal of Natural History. 2016. No. 3. P. 94—97.
10. **Шапарев А.В., Савин И.А.** Расчет совместной пластической деформации, необходимой для образования соединения металлов в холодном состоянии // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 10. С. 32—36.

Александр Васильевич Шапарев, канд. техн. наук,
meganeiii@yandex.ru;
Игорь Алексеевич Савин, канд. техн. наук

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,
тел.: (495) 785-6069,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 621.7.074

И.Е. Семёнов
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Экспериментально-аналитическое определение характеристик армированных полиуретанов

Изложены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов Муни—Ривлина, возникающих при плоской деформации образца из армированного полиуретана.

Ключевые слова: эластомеры; полиуретан; константы Муни—Ривлина.

The results of the experimental studies on determination of the Muni—Rivlin coefficients arising under plane strain of reinforced polyurethane sample are described.

Keywords: elastomers; polyurethane; Mooney—Rivlin constants.

Широкое применение полиуретановых эластомеров связано с их уникальными механическими свойствами: способности к большим обратимым деформациям при сравнительно небольших значениях модуля упругости, а также способности поглощать и рассеивать механическую энергию в широком температурном интервале. Именно эти особенности механических свойств определяют огромное значение эластомеров для современного машиностроения и других отраслей техники [1, 2].

Связь между напряжением и деформацией или выражение для упругого потенциала при деформировании эластичной среды могут быть получены при использовании разных подходов. Рассмотрим формулу для определения упругого потенциала через инварианты тензора деформации, предложенную Муни—Ривлином [1—3].

В общем виде потенциал Муни—Ривлина можно записать так [1, 2]:

$$W = \sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{\infty} C_{lm}\left(I_1 - 3\right)^l \left(I_2 - 3\right)^m, \qquad (1)$$

где C_{lm} — константы Муни—Ривлина, характеризующие поведение резиноподобного материала; I_1, I_2 — первый и второй инварианты тензора деформаций.

По Ривлину:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \qquad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2; \qquad (3)$$

формулы для определения констант Муни—Ривлина были получены ранее [1, 2]:

$$C_{10} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\sigma_i\left(\lambda_i{}^2 - \lambda_i^{-1}\right)}{2\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\lambda_i{}^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2} - C_{01}\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\lambda_i^{-1}\left(\lambda_i{}^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}{\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\lambda_i{}^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}; \qquad (4)$$

$$C_{01} = \frac{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\sigma_i\lambda_i^{-1}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)}{2\sum\limits_{i=1}^{n}\lambda_i^{-2}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2} - \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\lambda_i^{-1}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}{\sum\limits_{i=1}^{n}\lambda_i^{-2}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\sigma_i\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)}{2\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}}{1 - \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\lambda_i^{-1}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}{\sum\limits_{i=1}^{n}\lambda_i^{-2}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\lambda_i^{-1}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}{\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\lambda_i^2 - \lambda_i^{-1}\right)^2}}, \qquad (5)$$

где λ_i — главная степень деформации в i-м направлении; σ_i — соответствующее напряжение; n — число расчетных точек.

Данные, необходимые для вычисления по формулам (4) и (5), можно получить в результате проведения экспериментов.

На этапе экспериментальных исследований нагружали цилиндрический образец по схеме одноосного сжатия. Результаты нагружения цилиндрического образца использовали для вычисления коэффициентов Муни—Ривлина, результаты нагружения призматического образца — для дополнительной проверки их достоверности. Исследовали образцы из полиуретана марки СКУ-7Л.

Деформирование образцов проводили на испытательной машине INSTRON модели 600DX-F1-G1. На первом этапе исследовали цилиндрический образец высотой 10 мм и диаметром 65 мм. На рис. 1 показан цилиндрический образец, расположенный в испытательной машине перед нагружением.

График зависимости силы осадки F цилиндрического образца от хода x приведен на рис. 2. Из графика, представленного на рис. 2, определяли численные значения степеней деформации в соответствующих точках (λ_i) и напряжения, как отношения сил осадки к фактической площади поверхности контакта рабочего инструмента с образцом, которую также измеряли в ходе выполнения эксперимента.

Рис. 1. Осадка цилиндрического образца

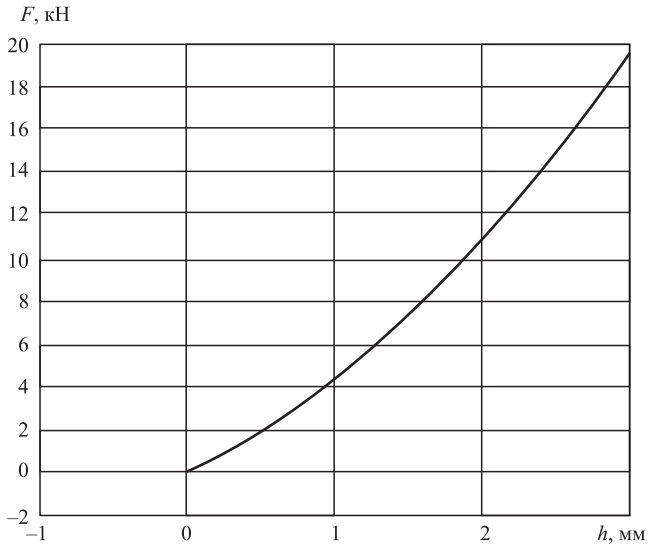


Рис. 2. Зависимость силы осадки цилиндрического образца от изменения высоты образца

Для $n = 7$ по формулам (4) и (5) были получены следующие результаты для СКУ-7Л:

$$C_{10} = 1{,}45;$$
$$C_{01} = 0{,}62.$$

Для того чтобы оценить точность полученных результатов и их пригодность для теоретических расчетов, решали обратную задачу: моделировали поставленные эксперименты, используя определенные на этапе экспериментального исследования константы Муни—Ривлина как исходные. В случае если результаты теоретического решения совпадут с достаточной точностью с экспериментальными результатами, то данные коэффициенты Муни—Ривлина можно применять при моделировании процессов деформирования полиуретана СКУ-7Л. Для этого была разработана математическая модель данных экспериментов с использованием специализированного программного комплекса Ansys [3—6].

При моделировании приняты следующие характеристики материалов и геометрические размеры образцов (идентичные использующимся в эксперименте): заготовка № 1 — цилиндр высотой 10 мм и диаметром 65 мм из полиуретана СКУ-7Л; плотность 3000 кг/м^3; коэффициент Пуассона 0,49; константы двухпараметрической модели Муни—Ривлина: $C_1 = 1{,}45$; $C_2 = 0{,}62$.

Результаты расчета приведены на рис. 3—5 (см. обложку).

На рис. 3 показано поле распределения эквивалентных напряжений (по Мизесу) в цилиндрической заготовке при ее деформировании. Результаты решения показали, что максимальные эквивалентные напряжения составляют 5,7 МПа в центральной части заготовки.

Сравним результаты теоретического решения с экспериментальными результатами. Сравнение проведем по силовым параметрам, т.е. по зависимостям сил от величины осадки (для осадки цилиндрической заготовки — результаты представлены на рис. 4) и по деформированному состоянию, т.е. по форме боковой поверхности.

Для цилиндрической заготовки сравнение максимальных сил дает погрешность $\delta = 6{,}0$ %.

На рис. 5 показаны конечно-элементные модели деформированного и недеформированного цилиндрического образца.

Сравним формы боковых поверхностей деформированного цилиндрического образца, полученные в ходе выполнения эксперимента и теоретического решения, путем наложения соответствующих изображений, полученных теоретически и экспериментально (рис. 6, см. обложку).

Из рис. 6 видно, что формы боковой поверхности, полученные теоретически при моделировании и экспериментально, совпадают с высокой степенью точности.

Из рис. 3 видно, что максимальные эквивалентные напряжения не превышают 6 МПа, что существенно ограничивает возможности деформирования листового металла по толщине (не более 0,5 мм) и по деформируемым материалам (мягкие алюминиевые сплавы), поэтому для расширения технологических

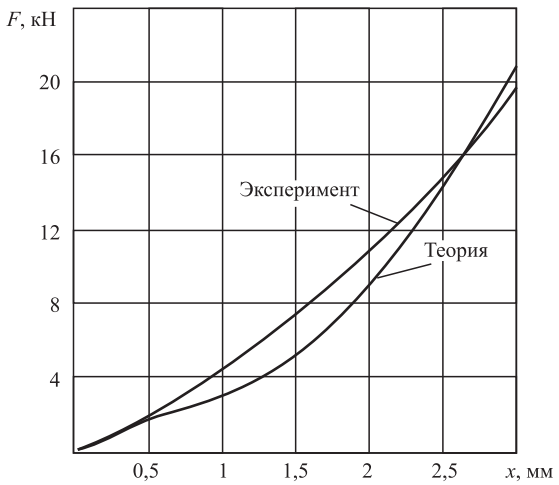


Рис. 4. Сравнение зависимости сил от величины осадки для теоретического решения и эксперимента

возможностей были проведены исследования, направленные на повышение жесткости эластичного инструмента путем его армирования. Для создания образцов был разработан композиционный материал, структура которого приведена на рис. 7 (см. обложку).

В качестве матрицы разработанного композиционного материала использовали лист толщиной 5 мм из полиуретана СКУ-7Л. Армирование осуществляли арамидными тканями. При разработке материала использовали ткани нескольких производителей. Образец арамидной ткани 8601-90 (кевлар) фабрики "Передовая текстильщица" представлен на рис. 8, *а*. Поверхностная плотность ткани 190 г/м^2; разрывная нагрузка: основа — 3430 Н, уток — 2940 Н; удлинение при разрыве: основа — 10 %, уток — 5 %.

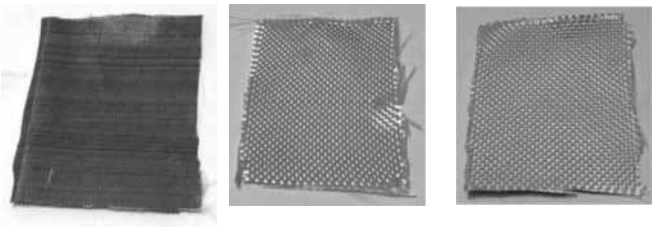
На рис. 8, *б* показан образец ткани Twaron 2200 компании DuPont. Поверхностная плотность ткани 220 г/м^2; удлинение при разрыве 2,7 %; предел прочности на разрыв 3014 МПа; модуль упругости 105 ГПа; тип плетения — саржевое (твил) полотняное.

На рис. 8, *в* приведен образец ткани 3360 компании Teijin Aramid. Поверхностная плотность ткани 468 г/м^2; удлинение при разрыве 3,7 %; предел прочности на разрыв 2863 МПа; модуль упругости 67 ГПа; тип плетения — полотняное (плейн).

Для получения необходимой адгезии со связующим и наполнителем проводили следующие операции по подготовке поверхности полиуретанового листа:

1. Создание достаточной шероховатости обработкой на шлифовальном круге и наждачной бумагой до создания матовой поверхности.

2. Обезжиривание и просушивание. Для обезжиривания использовали ацетон, так как именно он лучшим образом обезжиривает поверхность эластомеров.



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Образцы тканей для армирования

а — ткань 8601-90 фабрики "Передовая текстильщица"; *б* — ткань Twaron 2200 компании DuPont (США); *в* — ткань 3360 компании Teijin Aramid (Нидерланды)

3. Нагревание заготовки с использованием промышленного фена до температуры 80 °С.

4. Перед склеиванием на поверхность листа распыляли активатор цианоакриалата для увеличения скорости полимеризации клея и прочности клеевого шва.

После подготовки поверхности заготовок осуществляли их склеивание с арамидными тканями, для формирования прочного клеевого шва создавали необходимое давление. В результате для проведения исследований свойств материала было получено большое количество образцов (некоторые из них показаны на рис. 9):

1) цилиндрические образцы диаметром 50 мм, высотой 10 мм, представляющие собой склеенные полиуретановые заготовки диаметром 50 мм, высотой 5 мм. Использовали полиуретан марки СКУ-7Л;

2) цилиндрические образцы диаметром 50 мм, высотой 10 мм, представляющие собой композиционную конструкцию: матрица — полиуретан СКУ-7Л, армирующие элементы — арамидная ткань, связующее — цианоакрилат.

Первоначально было проведено нагружение цилиндрического образца, выполненного целиком из полиуретана СКУ-7Л, далее — нагружение цилиндрического образца из разработанного композиционного материала. Армирование осуществляли арамидной тканью 8601-90 фабрики "Передовая текстильщица". На рис. 10, *а* представлены результаты нагружения данного образца и образца из неармированного полиуретана, а на рис. 10, *б* — результаты нагружения композиционного образца, армированного тканью компании DuPont, и образца из полиуретана.

Далее было проведено нагружение композитного цилиндрического образца, для армирования которого использовали арамидную ткань 3360 компании Teijin Ara-mid (рис. 10, *в*).

С помощью полученных результатов рассчитывали значения напряжений и деформаций. На рис. 11 приведена зависимость напряжений

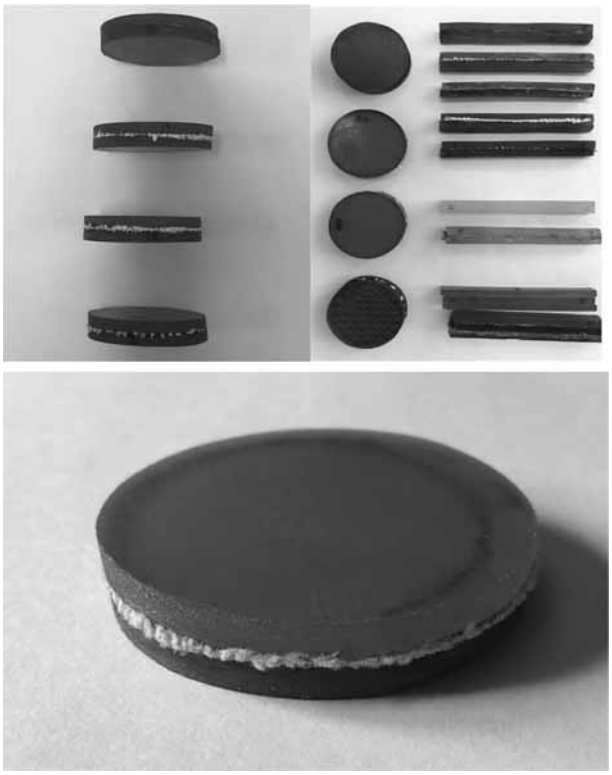


Рис. 9. Образцы для проведения исследований свойств материала

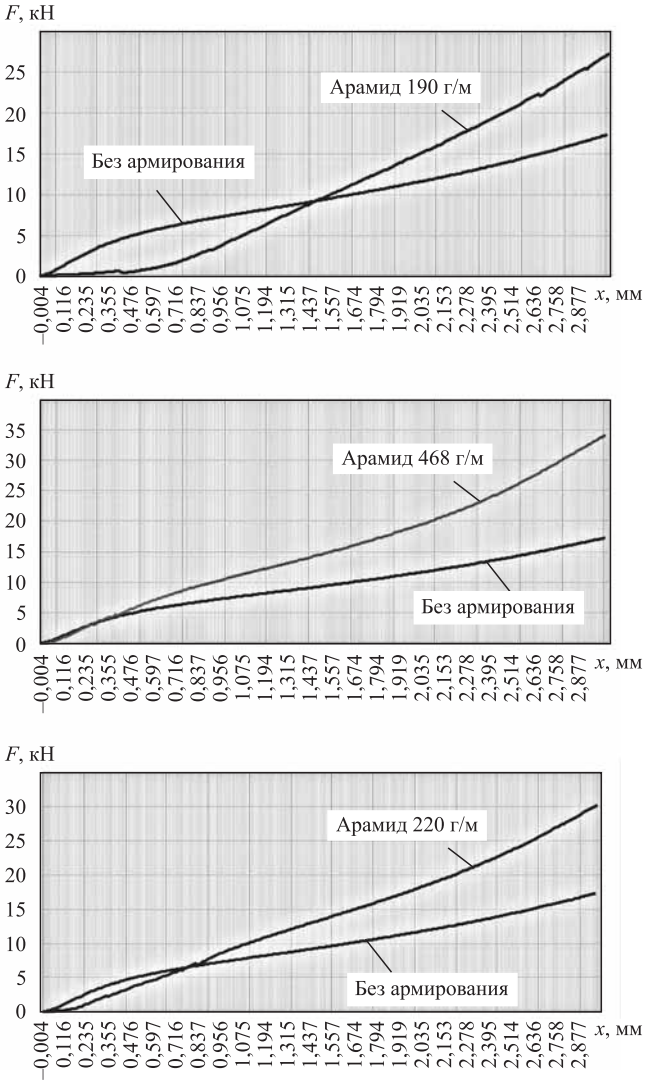


Рис. 10. Зависимость сил от величины осадки в случае одноосного сжатия образцов из различных композиционных материалов и образцов из полиуретана без армирования

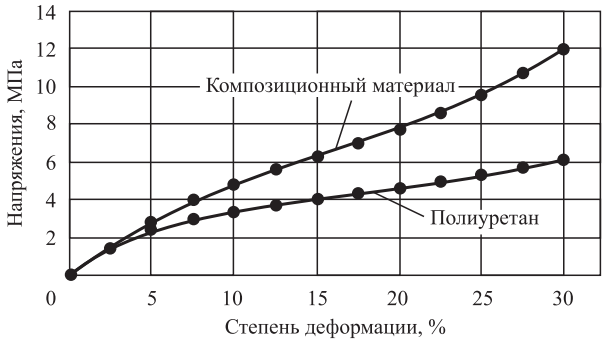


Рис. 11. Зависимость напряжений от степени деформации в случае одноосного сжатия образца из композиционного материала и образца из полиуретана без армирования

от степени деформаций для цилиндрического образца с армированием и без армирования.

Из рис. 11 видно, что напряжения на поверхности контакта, необходимые для сжатия образца из композиционного материала до степени деформации 30 %, превышают напряжения для полиуретанового образца в 2 раза.

Для расчета значений коэффициентов Муни—Ривлина по полученным экспериментальным данным в соответствии с рекомендацией [10], а также для автоматизации процесса и возможности быстро получать результаты по большому числу точек была написана программа на языке программирования Python.

В результате вычислений в программе были получены следующие коэффициенты Муни—Ривлина:

- для полиуретана СКУ-7Л: C_{10} = 2,42; C_{01} = 0,81;
- для композиционного материала, армированного тканью 8601-90 фабрики "Передовая текстильщица": C_{10} = 11,48; C_{01} = 3,86.

Выводы

1. Определенные по предложенной методике механические характеристики эластомеров являются пригодными для проведения теоретических расчетов при их деформировании со степенями деформации до 30 %.

2. Полученные значения коэффициентов Муни—Ривлина для армированного полиуретана позволят значительно расширить применение эластичного инструмента при обработке давлением тонкого листа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бухина М.Ф.** Техническая физика эластомеров. М.: Химия, 1984. 224 с.

2. **Муйземнек А.Ю.** Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа. Пенза: Информационный издательский центр ПГУ, 2005. 320 с.

3. **Рыженко С.Н., Крутова М.В.** Моделирование процесса деформирования полосы эластичным и жестким рабочим инструментом // Сталь. 2007. № 5. С. 83—87.

4. **Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Динамическое моделировании процесса локальной гибки-формовки для технологий производства покрытий для крыш // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 10. С. 40—43.

5. **Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния эластичного рабочего инструмента и тонколистовой заготовки в процессе локальной гибки-формовки: сб. тр. седьмой конф. пользователей программного обеспечения CADFEM GmbH. М.: Полигон-пресс, 2007. С. 350—354.

6. **Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Моделирование процесса формовки на профилегибочном стане с эластичным рабочим инструментом // Вестник МГТУ. 2010. 4 (79). С. 86—93.

7. **Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Моделирование процессов последовательной формовки продольных каналов в листе на стане с эластичным и жестким инструментом // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 6. С. 29—32.

Иван Евгеньевич Семёнов, д-р техн. наук,
sieprof@mail.ru

УДК 621.777.24

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова
(Московский государственный технологический университет "СТАНКИН")

Экспериментальная проверка возможностей холодной объемной штамповки стаканов из конструкционных сталей

На основе полученных экспериментальных данных по упрочнению стальных заготовок при холодной объемной штамповке осуществлен выбор технологических параметров процесса, позволивших обеспечить заданный комплекс механических характеристик, включающий в себя одновременно высокие показатели прочности и пластичности. Описано влияние формы рабочей части пуансона и конструкции штампа на силу штамповки деталей типа стаканов холодной закрытой прошивкой.

Ключевые слова: штамповка объемная холодная; детали типа стаканов; заготовки стальные; упрочнение; обеспечение заданных свойств; высокие прочность и пластичность; конструкции инструмента.

Experimental data on the hardening of steel billets and of the strains of cold forging were systematized using the methods of mathematical statistics. Parameters of the technological process are discovered for making the cold forging blank, having high strength and high ductility. The effect of the form of the working part of the punch and the design of the die on the forging force of parts such as cups cold closed drifting is described.

Keywords: cold forging; cup part; steels billet; hardening; ensuring of specified properties; high strength and high ductility; tool designs.

Холодной объемной штамповкой (ХОШ) изготовляют детали, не требующие последующей обработки резанием или нуждающиеся только в доводочных операциях, не связанных со значительным удалением металла в отход. Коэффициент использования металла при ХОШ составляет не менее 90 %.

Изготовленные ХОШ детали имеют комплекс механических характеристик, отличающийся от соответствующего комплекса в прокатанном прутковом материале, из которого изготовляют заготовки для производства деталей. Говоря об изменении комплекса механических характеристик стальных заготовок при ХОШ, можно провести аналогию с закалкой, сопровождаемой высоким отпуском. При этом следует учесть, что закалка эффективна только для средне- и высокоуглеродистых сталей, поскольку связанное с ней изменение комплекса механических характеристик деталей является следствием изменения растворимости углерода в железе в зависимости от температуры нагрева стали под закалку и скорости ее последующего охлаждения.

При ХОШ изменение комплекса механических характеристик деталей имеет не химическую природу, как при закалке, а природу, связанную с физикой металлов. Изменение механических характеристик происходит из-за упрочнения материала, являющегося следствием холодной пластической деформации зерен, сопровождающейся увеличением количества несовершенств их кристаллической структуры и затруднением внутризеренного смещения атомов по плоскостям скольжения.

Помимо хорошего комплекса механических характеристик деталей, преимущество ХОШ состоит в том, что изготовленные таким способом детали имеют сниженную (малую) шероховатость их поверхности.

Однако ХОШ не нашла до настоящего времени широкого применения в машиностроении. Связано это с трудностями, возникающими при разработке и реализации технологии.

Авторы настоящей статьи, преследуя цель расширения области применения ХОШ, решают две задачи:

1) конкретизация значений входящих в комплекс механических характеристик параметров, которые зависят от марки деформируемой стали, термической обработки исходной для ХОШ заготовки и степени обжатия заготовки при штамповке;

2) конкретизация формы пуансона для штамповки полости изготовляемой детали типа толстостенного стакана с позиций удержания на ней слоя смазочного материала и с позиций уменьшения удельной силы штам-

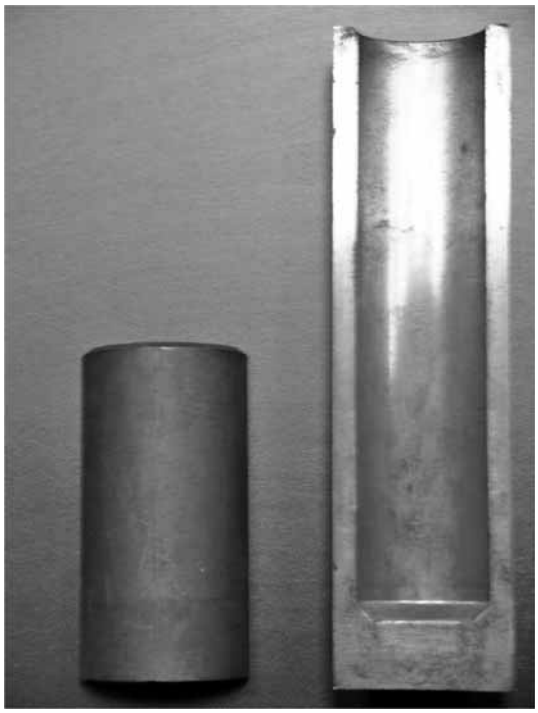


Рис. 1. Заготовка и штампованный из нее стакан

повки и обеспечения удовлетворительной стойкости пуансонов.

Обе задачи решены экспериментальным путем.

При изготовлении деталей типа стаканов (рис. 1) штамповкой из сплошных цилиндрических заготовок многие авторы используют термин "обратное выдавливание". Однако ранее обосновано [1], что более объективным является термин, предложенный в учебнике М.В. Сторожева, Е.А. Попова "Теория обработки металлов давлением" (Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.).

Удельная сила q (отношение деформирующей заготовку силы к площади инструмента, поперечной направлению силы, действующей с его стороны на заготовку) при ХОШ зависит от степени деформации заготовки. Степень деформации изменяется в ходе формоизменяющей операции, что можно строго оценить по методике, приведенной в [2]. Несмотря на рекомендацию о необходимости учета накопления деформации по ходу внедрения пуансона в заготовку [2], эта формула дает хороший результат по оценке степени деформации при ХОШ деталей типа стакан:

$$e = [F_{заг} - (F_{заг} - F_{пол})]/F_{заг} = d^2/D^2, \quad (1)$$

где $F_{заг}$ — площадь поперечного сечения заготовки; $F_{пол}$ — площадь поперечного сечения выдавленной полости стакана; D — внешний диаметр стакана, равный диаметру заготовки; d — внутренний диаметр стакана.

Поскольку рассчитанная по формуле (1) величина e не изменяется в ходе формоизменяющей операции, ее правильнее назвать степенью обжатия заготовки.

После определения q оценивают сопротивление усталости пуансонов. На рис. 2 приведена кривая сопротивления усталости деформирующих заготовку пуансонов, изготовленных из сталей Р18 и Р6М5 и закаленных на 61...63 HRC. Эта кривая построена на основании данных, приведенных в работе [3]. По этой кривой можно определить, во сколько раз увеличится сопротивление усталости пуансона при снижении удельной силы ХОШ, например, на 10 %.

При попытках подвергать ХОШ заготовки из среднеуглеродистых и среднелегированных сталей удельная сила, действующая на пуансон, превышает 2500 МПа, и его сопротивление усталости становится неудовлетворительным.

Количественно оценено изменение механических характеристик при ХОШ закрытой прошивкой цилиндрических стаканов из сплошных заготовок (см. рис. 1) для группы конструкционных сталей в зависимости от режима отжига заготовки перед прошивкой и от степени деформации заготовки, и это изменение описано в виде приведенных ниже простых алгебраических зависимостей. Полученные зависимости позволяют прогнозировать, какими станут механические характеристики заготовки, если деталь из нее изготовлять ХОШ.

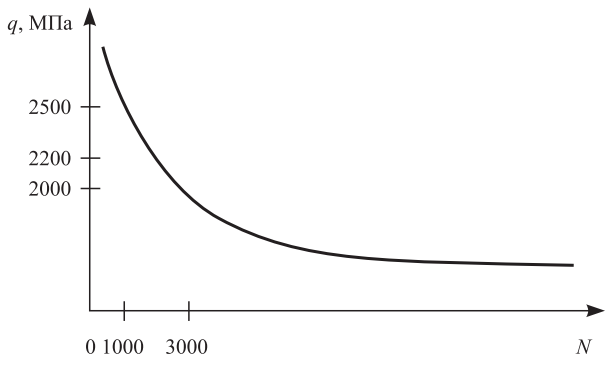


Рис. 2. Кривая сопротивления усталости пуансонов:

q — удельная сила; N — число циклов нагружений пуансона до образования усталостной трещины в инструменте

Стаканы с наружным диаметром 53,3 мм (см. рис. 1) штамповали из заготовок диаметром 53,3 мм в матрице с диаметром полости 53,3 мм. Стаканы с наружным диаметром 60 мм штамповали из заготовок диаметром 60 мм в матрице с диаметром полости 60 мм. Заготовки перед ХОШ подвергали фосфатированию и омыливанию для создания смазочного слоя. У всех указанных деталей диаметр полости составлял 40 мм. Исследование проведено на сталях Ст3, 20, 35 и 45. Для каждой из сталей режим отжига перед ХОШ выбирали в соответствии с рекомендациями для этой стали [2]. Конкретно выбранные режимы приведены в [4—8].

При изготовлении деталей с наружными диаметрами 53,3 и 60 мм степень обжатия заготовки составляла 56,3 и 44,5 % соответственно. Детали из сталей Ст3 и 20 штамповали за два перехода с промежуточным фосфатированием и омыливанием. Штамповать их за один переход было невозможно из-за разрыва смазочного слоя на поверхности формирующейся полости и вследствие этого схватывания между собой материалов пуансона и заготовки.

Поскольку перед промежуточным фосфатированием полуфабрикатов деталей после первого перехода проходило несколько суток наблюдалось деформационное старение материала. В результате старения при выполнении второго перехода закрытой прошивки таких полуфабрикатов удельная сила на пуансоне кратковременно возрастала примерно на 5 % по сравнению со своим средним значением во время операции прошивки. Упрочнения материала в течение прохождения формоизменения заготовки практически не было. Это можно объяснить протекающим одновременно с упрочнением разогревом деформируемого материала, приводившем к снижению его сопротивления деформации.

В связи с деформационным старением полуфабрикатов деталей иногда предлагают вариант технологии, при котором осуществляется промежуточный отжиг полуфабрикатов между переходами штамповки. Промежуточный отжиг устраняет эффект упрочнения материала, что снижает деформирующую силу, необходимую для выполнения второго перехода штамповки. Однако при такой технологии стенка изготовленного стакана будет иметь неравномерные по высоте показатели механических характеристик, рассмотренных ниже. Выравнивание этих показателей путем проведения заключительной термической обработки изготовленной детали исключает эффект упрочнения материала, достигаемый при ХОШ. Если ХОШ проводится только для уменьшения припусков на штампованной поковке, по сравнению с горячей объемной штамповкой, и не предустаривает упрочнения заготовки, то такой вариант технологии возможен. Однако промежуточный отжиг существенно повысит стоимость изготовленной детали и уменьшит целесообразность проведения ХОШ.

Штамповку деталей из сталей 35 и 45 осуществляли за один переход. Это объясняется меньшей схватываемостью среднеуглеродистых сталей 35 и 45 с инструментальными сталями, из которых изготовлены пуансоны.

Обсуждая удержание смазки на поверхности прошиваемой полости заготовки, отметим влияние формы рабочей части применяемых пуансонов.

Чертеж типового пуансона для штамповки закрытой прошивкой приведен на рис. 3 [2], где α_2 — угол конусности рабочей части пуансона. В зависимости от относительной толщины стенки изготовляемой детали его принимают равным 90...150°. Нижняя граница этого диапазона относится к толстостенным стаканам,

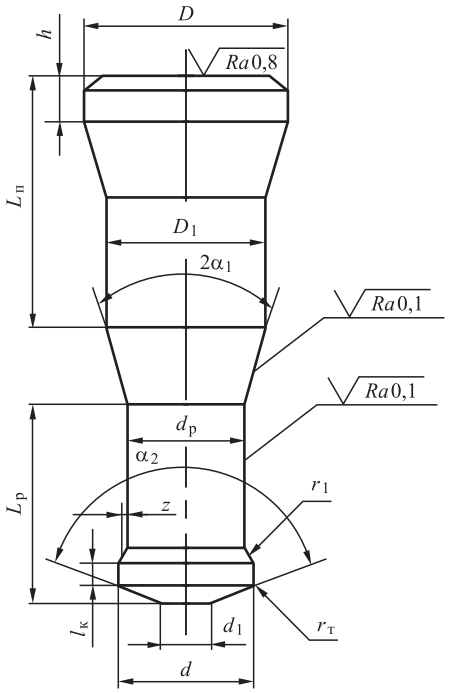


Рис. 3. Рациональная конструкция пуансона для штамповки стаканов закрытой прошивкой

а верхняя граница — к тонкостенным. Величина $d_1 = (0{,}2...0{,}5)d$. Значение $d_1 = 0{,}2d$ применяют при угле конусности рабочей части пуансона $\alpha_2 = 150^\circ$, т.е. для тонкостенных стаканов, а значение $d_1 = 0{,}5d$ — при $\alpha_2 = 90^\circ$, т.е. для толстостенных деталей.

Форма рабочей части пуансона в виде усеченного конуса и плоского участка позволяет увеличить площадь участка, удерживающего первоначально нанесенный смазочный материал, который потом растянется на всю площадь боковой прошитой полости. Коническая форма связана со стремлением соответствовать естественным линиям течения металла заготовки. Совпадение формы пуансона с этими линиями естественного течения позволяет уменьшить силу прошивки и повысить качество изделия. Указанные комбинации размеров позволяют наилучшим образом решить задачи по удержанию смазочного материала и наилучшему обтеканию головки пуансона материалом деформируемой заготовки.

Остальные указанные на рис. 3 размеры: $D_1 = 1{,}5d$; $D = 2d$; $l_к = 2...3$ мм; $r_т = 0{,}1d$; $r_1 = 0{,}2d$; $h = 5...15$ мм; $L_р = (1{,}5...2{,}5)d$; $L_п = 1{,}5...2$; $z = 0{,}05...0{,}15$ мм; $2\alpha_1 = 40...60^\circ$. Поскольку D_1 превышает $d_р$, для обеспечения надежного удержания пуансона на оси штампа $L_п$ должна быть не менее $L_р$.

Назначение при конструировании заведомо заниженного диаметра стержневой части пуансона, так же как при завышенном ее диаметре, приводит к увеличению удельной силы в стержневой части и как следствие — к снижению сопротивления усталости пуансона.

При радиальном шлифовании стержневой части пуансона в процессе его изготовления используют фальш-центры, которые удаляют перед шлифованием торцевых частей пуансона. После начала использования пуансона в работе может потребоваться корректировка его размера $d_р$.

Провести корректирующее радиальное шлифование, чтобы удалить образовавшуюся в начале эксплуатации бочкообразность стержневой части не представляется возможным из-за отсутствия центров, с помощью которых пуансон устанавливался в станке. Поэтому устранить бочкообразность можно обтачиванием стержневой части пуансона эльборовым резцом. В предположении такой технологии, на диаметр стержневой части пуансона на чертеже назначен не очень высокий квалитет. Эта поверхность после ее обтачивания не будет соприкасаться с поверхностью прошитой полости детали. Для обеспечения приемлемого с технико-экономических позиций сопротивления усталости пуансона наиболее важно, чтобы на его стержневой части отсутствовали следы обработки в виде рисок в окружном направлении.

Рассмотрение различных форм торца рабочей части пуансона показало, что наилучшее удержание смазочного материала при плоском торце на всем диаметре (d) калибрующего пояска пуансона. Однако при плоском торце сила закрытой прошивки максимальная. Минимальная сила при торце в виде полусферы с радиусом, равным радиусу калибрующего пояска пуансона. Однако такой торец является худшим с позиции удержания на своей поверхности смазочного материала. Пуансон с торцом в виде неусеченного конуса (с острой вершиной) имеет недостатки по силе штамповки и удержанию смазочного материала по сравнению с рассмотренными выше.

При закрытой прошивке детали с полостью, торец которой имеет заданную форму, следует применять пуансон с усеченным конусом, чтобы сила штамповки была сравнительно небольшой, и удержание смазочного материала было хорошим. Если требуется заданная иная окончательная форма торца полости детали, то ее можно обеспечить дополнительной последующей закрытой прошивкой калибровкой пуансоном соответствующей формы.

Для ХОШ заготовок из сталей 35 и 45 по традиционной схеме требуется создание со стороны формирующего полость пуансона удельной силы, превышающей 2500 МПа. Как было указано выше, при такой удельной силе процесс ХОШ перестает быть экономически оправданным, поэтому ХОШ деталей типа стаканов из всех исследуемых сталей проводили в штампе, схема которого приведена на рис. 4 и в котором была применена подвижная (плавающая) матрица.

В начале деформирования заготовка осаживается, заполняя зазор, с которым она была установлена в матрице. При этом благодаря трению на контакте с заготовкой матрица *9* опускается, сжимая пружины *11*. После начала внедрения пуансона в заготовку и формирования стенки стакана матрица *9* под действием

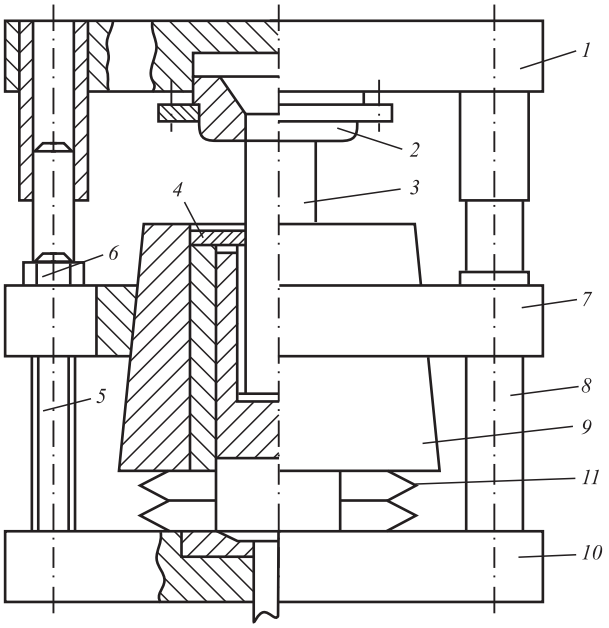


Рис. 4. Конструкция штампа:

1 — верхняя плита; *2* — пуансонодержатель; *3* — прошивающий полость стакана пуансон; *4* — съемник с пуансона; *5*, *6* — шпилька и гайка, ограничивающие подъем матрицы; *7* — центрирующая матрицу подвижная плита; *8* — направляющая колонка; *9* — матрица; *10* — нижняя плита; *11* — набор пружин, способствующих перемещению матрицы

контактного трения перемещается вверх. Этому способствуют также пружины *11*, накопившие энергию при осадке заготовки на предыдущей стадии. Благодаря перемещению матрицы вверх на части высоты очага пластической деформации заготовки создаются активно направленные силы контактного трения, способствующие вытеканию металла в стенку стакана.

Штамп, схема которого приведена на рис. 4, показан на рис. 5.

Примененный способ штамповки позволил уменьшить удельную силу на пуансоне приблизительно на 10 %, что существенно повышает сопротивление усталости пуансона, оцениваемое по кривой на рис. 2.

При ХОШ стаканов из сталей 35 и 45 были исследованы механические характеристики материала в трех состояниях: в состоянии поставки, в отожженном состоянии и после ХОШ закрытой прошивкой.

Результаты расчетов коэффициентов парной корреляции между приведенными в работах [4—7] механическими характеристиками для заготовок и штампованных из них деталей

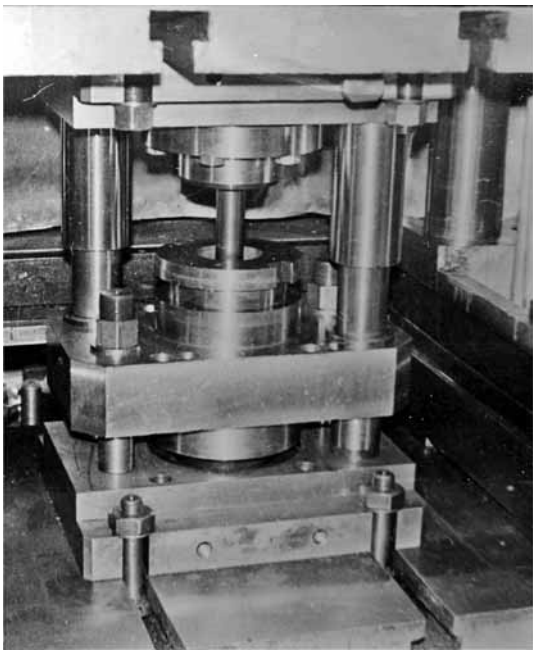


Рис. 5. Штамп для ХОШ, установленный на гидропрессе

позволили оценить значимость корреляционных связей между ними.

Между механическими характеристиками со значимой корреляционной связью были получены следующие уравнения:

$$\sigma_т = 4{,}1HB - 152;\ \sigma_в = 5{,}1HB - 352{,}6;$$
$$\psi = 130{,}6 - 0{,}44\ HB; \qquad (2)$$
$$\delta = 0{,}125\psi + 1{,}24;\ KCU = 8{,}7\psi + 226.$$

Эти уравнения позволяют прогнозировать механические характеристики изготовленной детали по результатам измерения на ней только твердости НВ. Однако эти уравнения применимы для деталей, изготовленных из рассмотренных в эксперименте сталей, при степенях обжатия 44,5...56,3 %.

По результатам проведенного исследования конструкторы, разрабатывающие детали машин, и технологи, изготовляющие эти детали, при согласовании марки стали имеют возможность оценить достигаемый комплекс механических характеристик детали.

Получением зависимостей (2) создана возможность неразрушающего и экономичного по трудозатратам контроля производственного процесса ХОШ закрытой прошивкой. Контроль сводится к периодическим замерам твердости изготовленных деталей.

Установлено [5—7], что управление параметрами процесса ХОШ позволяет обеспечить

заданный комплекс механических характеристик изделия, включающий в себя одновременно высокие прочность и пластичность. При этом удельная сила на пуансоне, прошивающем полость изделия в виде стакана, не должна превышать 2500 МПа,

$$q = 0{,}11\ \text{НВ}^2 - 24\ \text{НВ} + 11{,}4\ \text{СД} + 2782, \quad (3)$$

где СД — степень обжатия прошиваемой заготовки при изготовлении стакана.

Рассчитанные по модели (3) значения удельной силы ХОШ стаканов из различных сталей расходятся с результатами, измеренными в экспериментах, не более чем на 5 %.

Выбираемые параметры технологического процесса должны обеспечить получение детали с заданным комплексом механических характеристик: $\sigma_т \geqslant 700$ МПа; $\sigma_в \geqslant 750$ МПа; $\delta \geqslant 5$ %; $\psi \geqslant 40$ %; $KC\text{U} \geqslant 500$ кДж/м^2; НВ $\geqslant 220$. Удельная сила штамповки $q \leqslant 2500$ МПа.

Для оценки соответствия механических характеристик и удельной силы штамповки деталей заданным значениям была использована функция желательности [8, 9]:

$$d = \exp[-\exp(-y)], \quad (4)$$

где y — значение условного аргумента.

Исследователь на основании заданных требований и практического опыта ставит значения исследуемых параметров в соответствие со значениями аргумента y. При этом значению $y = 0$ соответствует минимально допустимое значение каждого исследуемого параметра.

В результате такой расстановки для исследуемых механических характеристик и удельной силы штамповки была составлена табл. 1.

Наличие табл. 1 и формулы (4) позволяет для каждого полученного при проведении эксперимента значения исследуемого параметра (предела текучести, ударной вязкости, удельной силы штамповки и т.п.) определить желательность получения такого значения этого параметра ($d\sigma_т$, $d_{KC\text{U}}$, d_q и т.п.).

После расчета желательностей для значений каждого из исследуемых параметров в данном опыте вычисляется обобщенная желательность $D_о$ значений всех параметров опыта как произведение частных значений желательностей каждого параметра в данном опыте. Это произведение возводится в степень 1/g, где g — число исследуемых параметров, в данном исследовании их 7.

1. Соответствие значений исследуемых параметров аргументу *y*

y	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ	ψ	$KC\text{U}$, кДж/м^2	НВ	q, МПа
	МПа		%				
0	700	750	5	40	500	220	2500
1	800	850	6,5	50	600	235	2000
2	900	950	8	60	700	250	1500
3	1000	1050	9,5	70	800	265	1000
4	1100	1150	11	80	900	280	500

Для обобщенной желательности была построена математическая модель вида (5), где X_1 — процентное содержание углерода в стали; X_2 — наличие отжига заготовки: $X_2 = -1$ соответствует ХОШ отожженной заготовки, $X_2 = +1$ соответствует ХОШ неотожженной заготовки; X_3 — степень деформации заготовки при закрытой прошивке.

Коэффициенты модели (5) определены по результатам эксперимента, матрица плана которого приведена в табл. 2.

Углерод в количестве 0,14 % содержали заготовки из стали Ст3пс (ГОСТ 380—2005), а углерод в количестве 0,44 % — заготовки из стали 45 (ГОСТ 1050—2013).

Справа от матрицы плана эксперимента в табл. 2 приведены значения частных желательностей для исследуемых параметров и обобщенной желательности $D_о$, рассчитанной указанным выше способом, а также значения удельной силы ХОШ стаканов в каждом из опытов.

Удельная сила входит в обобщенную желательность как одна из характеристик энергоемкости технологического процесса. Также в условиях ХОШ удельная сила на пуансоне ограничивает сопротивление усталости пуансона и таким образом является величиной, определяющей возможность применения технологии. Поэтому для нее построена модель (6).

После обработки результатов, приведенных в табл. 2, и вычисления коэффициентов

2. Матрица плана и результаты эксперимента

Номер опыта	Факторы			Желательности								q, МПа
	X_1, %	X_2	X_3, %	$d_{\sigma_т}$	$d_{\sigma_в}$	d_δ	d_ψ	d_{KCU}	$d_{НВ}$	d_q	$D_о$ (y_2)	
1	0,14	−1	44,5	0,12	0,03	0,74	0,56	0,47	0,01	0,83	0,18	1800
2	0,44	−1	56,3	0,64	0,75	0,48	0,10	0,26	0,60	0,45	0,40	2400
3	0,14	1	56,3	0,37	0,29	0,08	0,01	0,20	0,55	0,52	0,17	2300
4	0,44	1	44,5	0,74	0,72	0,90	0,70	0,57	0,64	0,37	0,64	2500

моделей вида (4) получены следующие уравнения:

$$D_о = 0{,}552 + 1{,}153X_1 + 0{,}059X_2 - 0{,}011X_3, \quad (5)$$

$$q = 1009 + 1333X_1 + 150X_2 + 16{,}95X_3. \quad (6)$$

Анализ модели (5) показал, что обобщенная желательность комплекса достигаемых механических характеристик и удельная сила прошивки возрастают при увеличении процентного содержания углерода в стали, штамповке неотожженной заготовки по сравнению со штамповкой отожженной заготовки и повышении степени деформации заготовки за переход.

Методом крутого восхождения по поверхности отклика [8, 9] для обобщенной желательности $D_о$, используя уравнение (5), исследована возможность повышения комплекса механических характеристик деталей. Одновременно для каждого сочетания параметров технологического процесса, соответствующего шагам по поверхности отклика для D, по уравнению (6) рассчитывали значения удельных сил. Последовательность реализации этого этапа исследования показана в табл. 3. Фактор X_2, характеризующий наличие отжига заготовки, в табл. 3 при одинаковых уровнях факторов X_1 и X_3 рассмотрен на его верхнем и нижнем уровнях: с отжигом и без отжига.

Результаты исследования, проведенного методом крутого восхождения по поверхности отклика для $D_о$, показали следующее. Варьируя рассмотренные три фактора (параметра технологического процесса), можно повысить комплекс механических характеристик детали при удельной силе ХОШ, находящейся в пределах 2500 МПа, на 9 % по сравнению с наилучшим комплексом, достигнутым при сочетании факторов в опыте № 4 (см. табл. 2).

Таким повышенным комплексом может быть следующий: $\sigma_т$ = 850 МПа; $\sigma_в$ = 900 МПа; δ = 7 %; ψ = 55 %; KCU = 750 кДж/м^2; 250 НВ.

Для увеличения механических характеристик целесообразно штамповать предварительно отожженные заготовки из стали с содержанием углерода 0,61 %, со степенью обжатия 46 % (см. табл. 3).

По формуле (1) определили, что изготовленный стакан при диаметре полости 40 мм и степени деформации 46 % должен иметь внешний диаметр 59 мм. Если внешний диаметр изделия меньше указанного и необходимо достижение наилучшего комплекса механических характеристик, то надо обтачивать

3. Крутое восхождение по поверхности отклика для D при контроле q

Номер опыта	Содержание углерода, %	Наличие отжига	Степень деформации, %	$D_о$	q, МПа
1	0,37	С отжигом Без отжига	49,3	0,393 0,511	2187 2487
2	0,45	С отжигом Без отжига	48,2	0,497 0,615	2277 2577
3	0,53	С отжигом Без отжига	47,1	0,601 0,719	2364 2664
4	0,61	С отжигом Без отжига	46	**0,704** 0,822	**2451** 2751
5	0,69	С отжигом	44,9	0,815	2547

штампованный стакан по наружной поверхности или осуществлять его вытяжку с утонением стенки. Однако вытяжка с утонением стенки может изменить полученный при закрытой прошивке стакана комплекс его механических характеристик.

Помимо оценки комплекса достигаемых при ХОШ механических характеристик детали и оценки стойкости пуансона при разработке технологического процесса ХОШ приходится решать еще ряд проблем. Эти проблемы связаны с тем, что при желаемом отсутствии последующей обработки штампованной детали резанием требуется соблюдение особых правил назначения допусков на рабочие части деформирующего заготовки инструмента (пуансонов и матриц), рациональное конструирование бандажированных матриц, конструирование штампа с наилучшим обеспечением соосности пуансона и матрицы и др. Решению этих проблем посвящены работы [10, 11].

Тщательное ознакомление технологов с полным комплексом проведенных к настоящему времени и опубликованных исследований позволит им избежать ошибок при разработке технологических процессов ХОШ и конструировании штампов и, таким образом, будет способствовать расширению области применения ХОШ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Снижение** силы при штамповке стаканов способом совмещения операций закрытой прошивки заготовки и раздачи формуемой стенки поковки / С.Н. Григорьев, А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник машиностроения. 2013. № 5. С. 74—78.

2. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка деталей из компактных и порошковых материалов / под ред. А.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.

3. **Наукоемкие** технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с. / Глава 3. Наукоемкие технологии при производстве заготовок обработкой давлением / В.А. Демин, А.М. Дмитриев, В.Н. Субич, Н.А. Шестаков. С. 68—114.

4. **Григорьев С.Н., Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Механические характеристики конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке и их описание аппроксимирующими зависимостями // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 12. С. 23—26.

5. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 41—44.

6. **Использование** изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник машиностроения. 2015. № 4. С. 54—56.

7. **Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В.** Специализированное штамповочное оборудование и выбор его технологических параметров. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2016. 334 с.

8. **Новик Ф.С., Арсов Я.Б.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.

9. **Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В.** Формализованное описание и разработка технологических операций машиностроения: учеб. пособие для вузов. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2019. 176 с.

10. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Снижение деформаций штампов при холодном выдавливании стальных стаканов с активно направленными напряжениями контактного трения по матрице // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 5. С. 72—84.

11. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Конструирование штампов для холодного выдавливания стаканов при создании активно направленных напряжений контактного трения заготовки по матрице // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Выпуск 5. С. 85—96.

Александр Михайлович Дмитриев, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН;
Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук,
mt-6@yandex.ru

УДК 621.774.2:621.981.1

О.В. Соколова, А.А. Моисеев
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана),
А.Е. Лепестов *(АО "СиСофт", г. Москва)*

Компьютерное моделирование валковой формовки труб

Создание цифровой модели процессов в современном металлургическом производстве позволяет спрогнозировать поведение заготовки при заданных начальных условиях, параметрах материала и оборудования, а следовательно, предсказать возможное появление брака, спроектировать качественный инструмент, сократить расходы на корректировку исходных данных, апробацию и внедрение, снизить временные затраты.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; формовка; трубоформовочные станы; прямошовные трубы; метод конечных элементов.

The development of digital modeling in modern metallurgical engineering allows predicting the billet behavior under initial conditions, material properties and equipment parameters. It means one can foreknow possible defect appearance, design high quality tool, reduce future expenses for initial conditions correction, approbation and mastering. It allows reducing time of process development.

Keywords: computer simulation; continuous forming; tube-forming mills; longitudinal welded tubes; finite element method.

В настоящее время в металлургической промышленности при проектировании, исследовании, апробации и внедрении новых технологий и оборудования все чаще отказываются от проведения физического эксперимента, который ведет к значительным материальным и временным потерям.

Альтернативой может служить компьютерное моделирование процессов, позволяющее спрогнозировать поведение материала при заданных начальных условиях и параметрах оборудования. Существует множество способов компьютерного моделирования: создание модели самостоятельно на одном из языков программирования или использование уже существующих пакетов моделирования, таких как универсальные пакеты программ с модулями под различные задачи, например, механика деформируемого твердого тела, механика жидкостей и газов, моделирование литейных процессов, прочностные расчеты и т.п.

Внедрение нового метода исследований представляет собой широкий спектр задач, во многом отличающихся друг от друга. Чтобы показать его возможности, в качестве примера остановимся на процессе валковой формовки прямошовных труб (рис. 1), наиболее распространенном в отрасли производства данного вида продукции [1].

Компьютерное моделирование методом конечных элементов или методом конечных разностей корректно отнести к теоретическим методам исследования технологических процессов. Нередко данный способ называют численным экспериментом.

На кафедре МТ-10 "Оборудование и технологии прокатки" МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана математическая модель на базе программного комплекса COPRA RF, позволяющая проводить исследования по анализу процесса формообразования и давать рекомендации инженеру, проектирующему технологический процесс и конструкцию оборудования для производства труб и профилей [2].

На первый взгляд может показаться, что данный процесс очень прост, и освоение производства нового сортамента труб не пред-

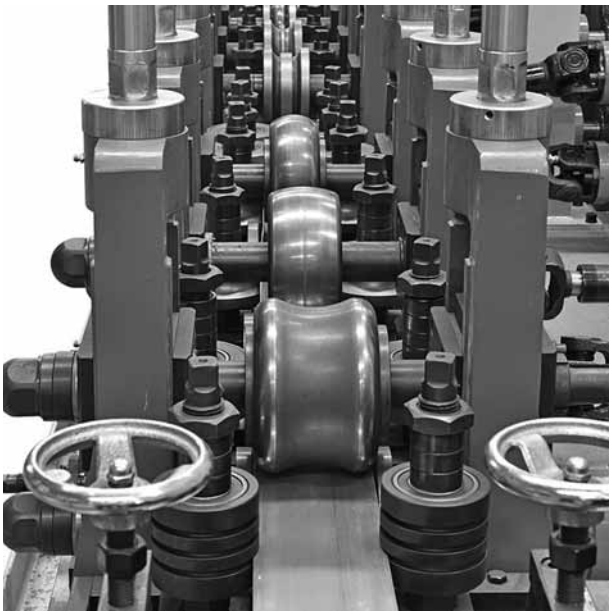


Рис. 1. Трубоформовочный стан

ставляет никаких сложностей, однако это не так. Рассмотрим классическую конструкцию клети формовочного стана *трубоэлектросварочного агрегата* (ТЭСА) (рис. 2).

В клети стана закреплены два горизонтальных валка со сложной формой профиля. В каждой следующей клети форма изменяется и происходит сворачивание плоской заготовки в круглую, т.е. происходит непрерывная гибка за счет вращающегося инструмента. Инструмент выполнен таким образом, что при необходимости производства труб с другой толщиной стенок валки просто раздвигаются.

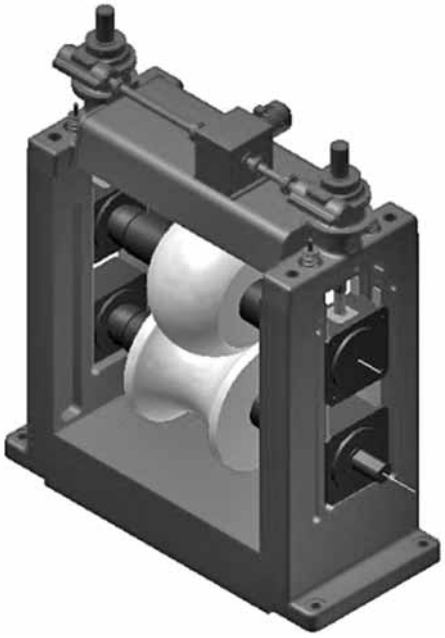


Рис. 2. Классическая конструкция клети трубоформовочного стана ТЭСА

Однако при переходе на другой диаметр необходима полная замена валкового инструмента. На станах, производящих трубы малого диаметра (до 114 мм), это может происходить за несколько часов, а на станах, производящих трубы среднего диаметра (114...530 мм) процесс перевалки может занимать до двух дней. В условиях массового и серийного производств это ведет к большим потерям.

Моделирование процесса валковой формовки позволило бы предсказать появление брака, спроектировать качественный инструмент и сократить расходы на корректировку валкового инструмента и пусконаладку.

На стабильность процесса влияет множество факторов, например, схема (калибровка) валкового инструмента. Она может быть однорадиусной (рис. 3, *а*) (т.е. в каждом калибре радиус по ширине заготовки постоянный), двухрадиусной (рис. 3, *б*) (околокромочная зона и центральная зона имеют различные радиусы), многорадиусная, W-образная (рис. 3, *в*) и т.д.

Тип калибровки зависит от изготовляемого типоразмера и материала, которые устанавливают границы допускаемых и необходимых величин гибки заготовки. Как показали исследования с помощью моделирования, на качество сварной заготовки и стабильность технологического процесса во многом влияют общая длина формовочного стана, число клетей и расстояние между ними [3]. Все указанные факторы могут быть учтены в модели и оптимизированы виртуально, без затрат на физический эксперимент.

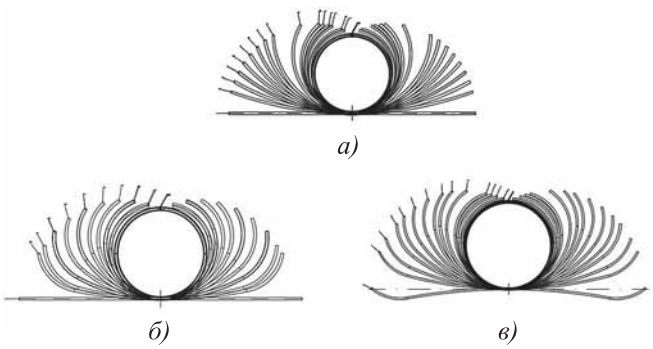


Рис. 3. Виды калибровок трубоформовочного стана:
а — однорадиусная; *б* — двухрадиусная; *в* — W-образная

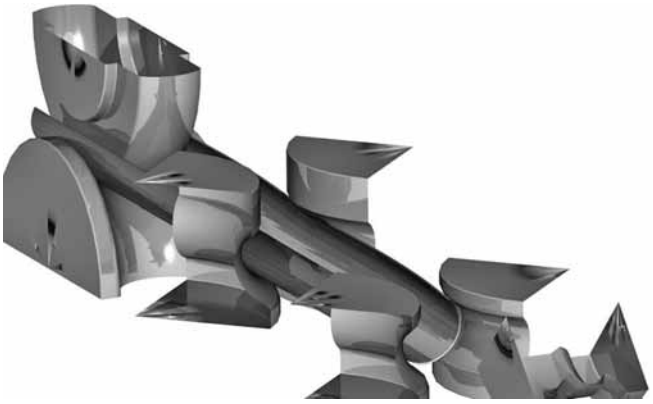


Рис. 4. Пример моделирования валковой формовки труб

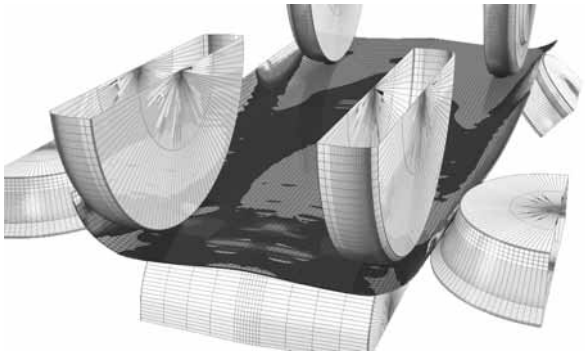


Рис. 5. Моделирование процесса валковой формовки трубы на стане ТЭСА 203-530

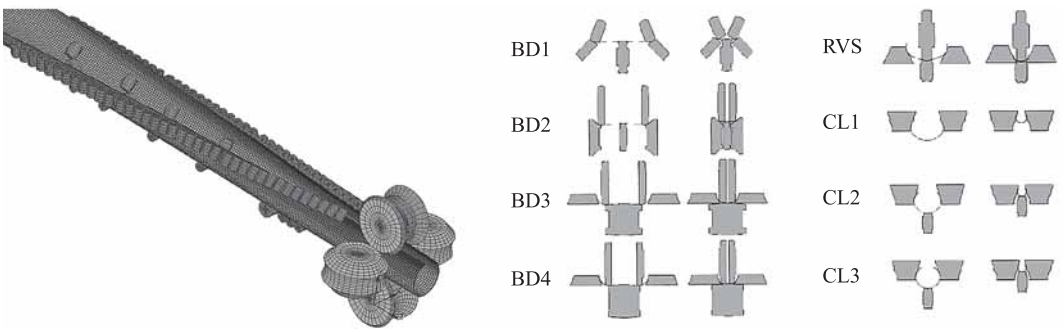
Применение компьютерного моделирования в данной отрасли широко зарекомендовало себя во всем мире (рис. 4). Например, на Выксунском металлургическом заводе удалось решить ряд серьезных технологических проблем при производстве существующих типоразмеров труб и при освоении нового сортамента (рис. 5). К данным проблемам относились: образование излома кромки, некорректная ширина заготовки, некачественная гибка полосы и т.п. [4].

Как было указано, процесс перевалки может занимать до двух дней на станах, производящих трубы среднего диаметра. Именно поэтому на сегодняшний день растет тенденция к унификации инструмента, чтобы максимально снизить время перевалки. К таким технологиям можно отнести CageForming: в одной клети находится ряд маленьких роликов, которые могут свободно позиционироваться в пространстве (рис. 6, *а*); технология FFX (от компании Nakata): валковый инструмент имеет сложный контур эвольвенты и может свободно позиционироваться в пространстве клети (рис. 6, *б*).

Для обеих технологий характерно время перевалки не более 30 мин, что резко увеличивает возможности заводов-производителей. Однако стоимость данного оборудования и инструмента значительно выше, что требует их тщательной и качественной настройки. Именно поэтому актуальным является использование компьютерного моделирования для определения формы профиля инструмента, его в клетях, обеспечивающих стабильный процесс формовки [5].

Общая схема освоения компьютерного моделирования процесса производства представлена на рис. 7.

На заключительной стадии внедрения и использования компьютерного моделирования достаточно от нескольких часов до двух недель (в зависимости от сложности процесса) спроектировать схему производства нового сорта-



а) *б)*

Рис. 6. Схема трубоформовочных станов с гибким инструментом:
а — CageForming; *б* — FFX

Рис. 7. Схема освоения компьютерного моделирования процесса производства

мента продукции или скорректировать уже существующую, при этом по результатам моделирования будет спроектирована оснастка или изменены параметры процесса, которые позволят освоить его в "металле" с минимальными временными и денежными затратами на пусконаладку.

Реальное производство и математическая модель тесно связаны друг с другом и уточнение модели спроектированного процесса производится на основании физического эксперимента, проведенного в процессе пусконаладки, что позволяет устранить последующие ошибки при решении подобных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Соколова О.В., Лепестов А.Е., Моисеев А.А.** Пути расширения технических возможностей оборудования для производства труб нефтегазового сортамента методом валковой формовки // Производство проката. 2014. № 4. С. 28—31.

2. **Прогнозирование** качества сварных труб большого диаметра для магистральных трубопроводов / А.Г. Колесников, О.В. Соколова, А.Ю. Скрипкин, А.Е. Лепестов // Черная металлургия. 2013. № 5 (1361). С. 68—70.

3. **Соколова О.В., Лепестов А.Е.** Новый метод определения длины стана при непрерывной валковой формовке // Производство проката. 2016. № 3. С. 25—27.

4. **Новокшонов Д.Н., Лепестов А.Е.** Обеспечение устойчивости кромок трубной заготовки при непрерывной валковой формовке // CADmaster. 2016. № 3 (85). С. 34—37.

5. **Инновационные** технологии в области моделирования линейной формовки на примере "Cage forming" / А.Ю. Скрипкин, А.Е. Лепестов, О.В. Соколова, М.О. Миронова, Е.В. Лагошина // Тезисы докладов Междунар. конф. "Технологии и оборудование прокатного производства", 30—31 октября 2012 г.

Ольга Вадимовна Соколова, канд. техн. наук;
Андрей Анатольевич Моисеев,
moiseev.andrey@csoft.ru;
Антон Евгеньевич Лепестов, канд. техн. наук

УДК 621.771.63

С.В. Поворов[1], Д.В. Егоров[2], Д.С. Волгин[1]
([1]Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, [2]ООО "Мобипроф", г. Москва)

Производство специального профиля из листовой заготовки методом формовки в роликах для изготовления наборных теплообменных панелей

Рассмотрен процесс формовки специального профиля, сопровождающийся возникновением дефектов. Для устранения дефектов исследовано напряженно-деформированное состояние заготовки методом математического моделирования, в результате которого установлена взаимосвязь между деформацией заготовки и образованием дефекта, что позволило выявить причины и локализовать место его возникновения. Внесены изменения в конструкцию калибров, которые по результатам опытных исследований позволили получить профиль требуемого сечения без дефектов.

Ключевые слова: профилегибка; листовой металл; калибровка; теплообменные панели.

The special shape forming process accompanied by defects in the shape is considered. The strained condition is studied by means of mathematical process modeling to eliminate the defects. There is correlation between shape strain and defect formation and this made it possible to understand reasons and to locate the place of occurrence of the defect. The passes design changes are made that allowed to get quality shape without the defects.

Keywords: roll forming; sheet blank; grooving; heat-exchange panels.

Введение. Профили, получаемые методом валковой формовки, применяют в разных отраслях. Данный метод производителен и позволяет использовать мобильное оборудование, что упрощает организацию производства профилей. Благодаря универсальности данного метода можно получать профили различных видов, так называемые С-, П-, Омега-, Z- и другие из заготовок различных сплавов и с разными толщинами. Перспективным направлением считается производство сборных теплообменных панелей из гнутых профилей.

Исследуемый профиль СПО-04.30×23-8×3в применяют для производства теплообменников. Благодаря наличию на профиле высокого центрального ребра увеличивается площадь его поверхности, что положительно влияет на его способность к теплопередаче. Профиль имеет сечение специальной формы, которое позволяет набирать теплообменные панели различной ширины.

Поперечное сечение профиля и его размеры изображены на рис. 1, *а*, часть теплообменной панели, собранной из данного профиля, показана на рис. 1, *б*.

Данный профиль является асимметричным, так как имеет разную высоту вертикальных полок, а крайние кромки загнуты в одну и ту же сторону. Поэтому в процессе подгибки элементов профиля поперечные силы и моменты не будут компенсировать друг друга, как в случае симметричного профиля. Наличие данных особенностей может способствовать образованию дефектов в виде скручивания и продольного изгиба в процессе профилирования. Чтобы предотвратить появление этих дефектов, необходимо спроектировать калибровку таким образом, чтобы влияние неуравновешенных сил и моментов было сведено к минимуму за счет специально подобранных параметров технологического процесса.

Проектирование калибровки. Процесс профилирования целесообразно разделить на два этапа: 1) формовка центральной части профиля;

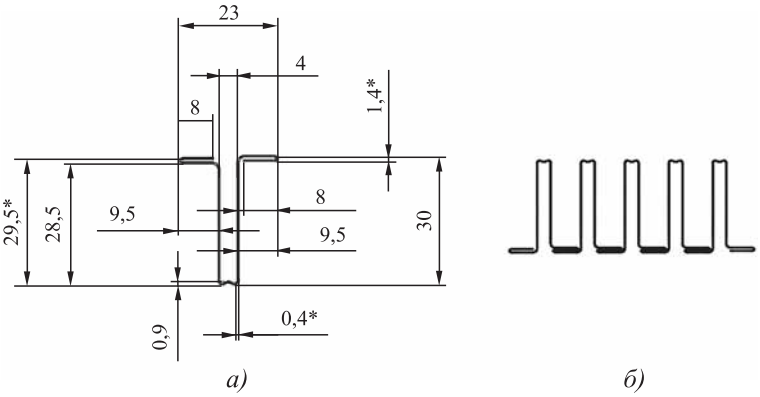
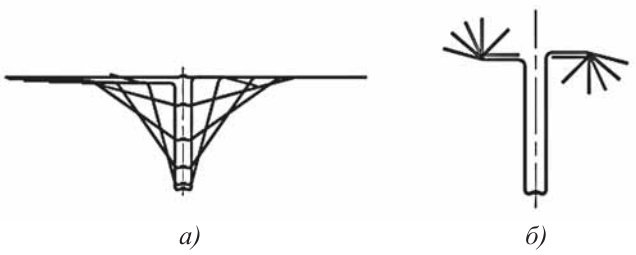


Рис. 1. Профиль СПО-04.30×23-8×3в:

а — поперечное сечение и размеры профиля, * — неконтролируемый размер, штрипс ≈95 мм; *б* — фрагмент сборной теплообменной панели



а) *б)*

Рис. 2. Схема подгибки элементов профиля:
а — 1-й этап; *б* — 2-й этап

2) подгибка кромок. Подобное разделение процесса профилирования позволяет повысить качество производимого профиля, уменьшить количество дефектов, а также снизить нагрузку на узлы станка. Формообразование центрального ребра показано на рис. 2, *а*, подгибка крайних кромок — на рис. 2, *б* [1].

На рис. 3 приведено обозначение углов подгибки на профиле. Профиль подобного вида встречается редко, поэтому опираться на спроектированные ранее конструкции калибров и полученный при их изготовлении и наладке опыт невозможно. Углы подгибки изначально подбирали на основе опыта проектирования профилей другого типа, имеющих схожие с данным конструктивные элементы [2—4].

В 1-й клети осуществляется только формовка канавки на дне профиля, что облегчает захват заготовки роликами и подачу в станок полосы оператором. По опыту проектирования калибровок для производства подобных профилей известно, что тянущей силы, создаваемой 1-й клетью, будет недостаточно для задания заготовки во 2-ю клеть, если угол подгибки в ней будет сравнительно большим, поэтому для обеспечения гарантированного захвата заготовки во 2-й клети углам подгибки β и ψ задано значение 15°.

Увеличение углов подгибки в клетях 3—5 происходит с равным шагом 20°. В 6-й клети углы β и ψ повышаются на 15° для того, чтобы снизить интенсивность деформирования, так как в этой клети одновременно заканчивается 1-й этап формообразования и начинается 2-й этап. На 2-м этапе предложено увеличивать угол подгибки α также с постоянным шагом. Но на этом этапе происходит превращение сечения заготовки из открытого в закрытое при значении угла подгибки $\alpha = 90°$. Если осуществлять подгибку на этом этапе с шагом 36°, то возникнет случай, когда угол подгибки будет изменяться от 72 до 108°. При таком переходе кромка заготовки не зайдет в закрытый калибр из геометрических соображений. Поэтому для обеспечения захода заготовки в закрытый калибр необходимо, чтобы калибровка содержала клеть, в которой угол подгибки составляет 90°.

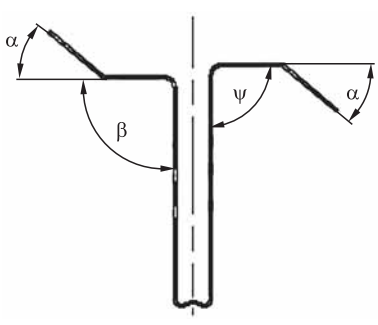


Рис. 3. Обозначение углов подгибки

Таким образом, на 2-м этапе формообразования предложено увеличивать угол подгибки α с шагом 25° до достижения угла 90°, а далее с шагом 45° до завершения процесса. В табл. 1 приведены значения углов подгибки в каждой клети.

По выбранным углам подгибки спроектирован и изготовлен рабочий инструмент, собран профилировочный станок. После наладки станка был проведен эксперимент, в ходе которого на профиле образуются такие дефекты, как: скручивание, продольный изгиб и кромковая волнистость. Профиль с дефектами показан на рис. 4.

Моделирование процесса профилирования. Для устранения дефектов принято решение исследовать данный процесс с помощью математического моделирования с использо-

1. Значения углов подгибки в клетях, °

Угол подгибки	Номер клети										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
α	0	0	0	0	0	15	40	65	90	135	180
β		15	35	55	75	90	90	90		90	90
ψ											

а) *б)*

Рис. 4. Дефекты на профиле:
а — кромковая волнистость; *б* — продольный изгиб, скручивание

ванием программы Ansys/Ls-Dyna [3, 4]. Для этого была создана математическая конечно-элементная модель процесса профилирования. Математическая модель роликов и заготовки шириной 95 мм и длиной 700 мм представлены оболочечными элементами Shell 163. Модель материала заготовки, изготовленной из стали марки 08пс — билинейная изотропная. Свойства стали 08пс: плотность 7850 кг/м^3; модуль Юнга $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 250 МПа; модуль упрочнения 500 МПа.

Формующие ролики представлены абсолютно жесткими телами (Rigid Body) и для математической модели можно использовать только их рабочую поверхность, контактирующую в процессе профлирования с заготовкой. Общее число элементов в модели составило 83 808. Для учета контактного взаимодействия заготовки и инструмента использован контакт Forming surface-to-surface contact (FOSS). Также в данном профиле присутствуют элементы, подгибаемые на угол 180°, при подгибке на такой угол поверхности листовой заготовки могут соприкасаться друг с другом, для учета этой особенности был задан контакт surface-to-surface contact (SS).

Чтобы ограничить вертикальные перемещения заднего конца заготовки, 1-я клеть в модели сделана с гладкими цилиндрическими направляющими роликами. Заготовке была сообщена начальная скорость, равная скорости прокатки 10 м/мин, для того, чтобы она вошла в 1-ю клеть. Для всех нижних роликов задана одинаковая скорость вращения, так как только нижние ролики стана имеют привод. Расстояние между осевыми плоскостями роликов составляет 188 мм, как в конструкции стана. Модель с конечно-элементной сеткой представлена на рис. 5.

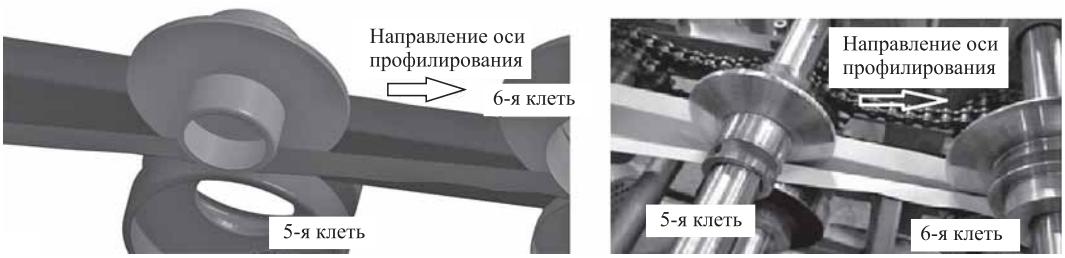
При анализе результатов решения обнаружено, что математическая модель отражает дефекты, наблюдаемые в процессе эксперимента, в частности на математической модели видно возникновение кромковой волнистости, продольного изгиба и скручивания профиля. Модель также подтвердила, что дефект в виде волнистости кромок образуется между 5-й и 6-й клетями, как и наблюдалось в процессе эксперимента, где осуществляется переход от 1-го этапа деформации ко 2-му этапу. Образование дефекта показано на рис. 6.

Рис. 5. Расчетная сетка математической модели

Для выяснения причин возникновения волнистости кромок на основе результатов моделирования был построен график продольных деформаций кромки заготовки (рис. 7). Для наглядности на графике вертикальными штриховыми линиями показано расположение осевых плоскостей роликов каждой клети. Из рис. 7 видно, что между 5-й и 6-й клетями значение деформаций изменяется от растяжения — более 1 % до сжатия −0,75 %. Под действием деформаций сжатия кромка теряет устойчивость, что приводит к образованию волнистости.

Анализ рис. 7 и табл. 1 показал, что продольная деформация связана с углом подгибки. Большие деформации вызваны большим углом подгибки кромки за переход. Из этого можно сделать вывод, что для устранения дефекта волнистости нужно уменьшить угол подгибки в 6-й клети, что должно привести к уменьшению продольных деформаций.

Также на рис. 7 виден большой скачок деформации между 10-й и 11-й клетями, что указывает на возможное возникновение дефекта в виде волнистости кромки. На рис. 8 показана деформированная геометрия заготовки, полученная в результате решения, на которой хорошо различима волнистость кромки между этими клетями.



а) *б)*

Рис. 6. Образование кромковой волнистости:

а — математическая модель; *б* — профилировочный станок

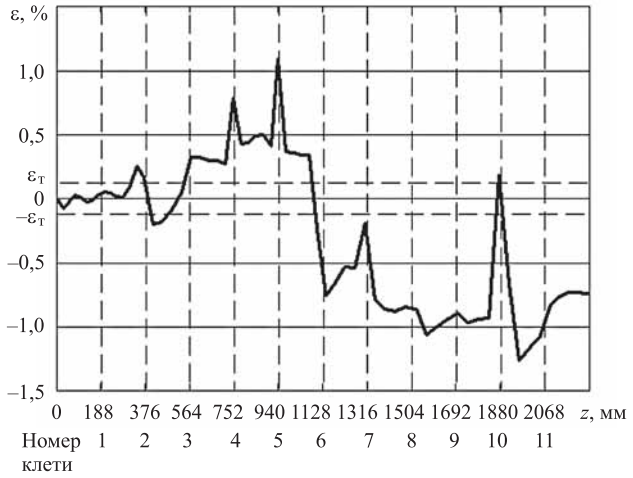


Рис. 7. График продольной деформации кромки заготовки

Это подтверждает связь между волнистостью и продольной сжимающей деформацией кромки.

Дефекты продольного изгиба и скручивания являются следствием возникновения неуравновешенных сил и моментов при профилировании из-за асимметричной формы профиля. Как показал опыт, данные дефекты легко исправляются в процессе настройки станка смещением валков последней клети вдоль оси в направлении, противоположном изгибу до устранения дефекта. Поэтому при дальнейшей модернизации формы профилирующих роликов будем стремиться избавиться только от дефекта кромковой волнистости.

Анализ результатов математической модели показал, что необходимо снизить продольные деформации кромки. Это можно сделать, добавив дополнительную клеть между переходами, где образуется дефект, или изменить существующий вариант калибровки, более равномерно распределив деформации по клетям, при этом оставив прежним их общее количество. Из-за бóльшей экономической целесообразности был выбран 2-й вариант, так как он не требует добавления дополнительной клети и, соответственно, затрат на изготовление ее деталей и удлинения рамы.

Модернизация калибровки. Главная цель модернизации калибровки — уменьшение скачков

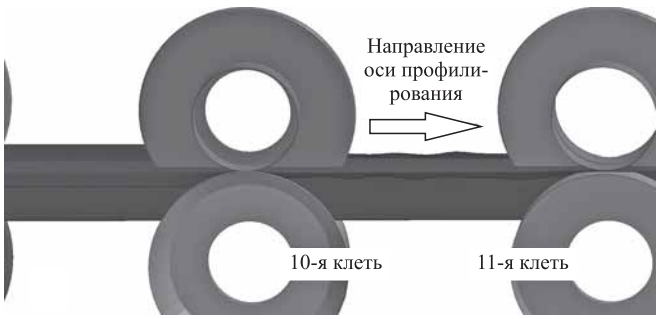


Рис. 8. Волнистость заготовки между 10-й и 11-й клетями

продольных деформаций на кромке. Исходя из этого, были подобраны углы подгибки (табл. 2). Так как было принято решение не вносить изменений в конструкцию стана, то для более плавного формоизменения профиля и распределения углов подгибки по клетям первый калибр, в котором происходила только формовка центральной канавки, заменили на калибр, в котором одновременно формуется центральная канавка и увеличиваются углы подгибки β и ψ.

Для обеспечения надежного захвата заготовки необходимо, чтобы верхний ролик также имел привод. Для выравнивания катающих диаметров роликов, формующих левую и правую части профиля, на первых трех переходах углы β и ψ сделаны разными: 16 и 15°; 36 и 34; 55 и 51° соответственно для каждой клети. В 4-й и 5-й клетях углы подгибки центрального ребра β и ψ уравняли между собой до значений 75 и 85° для каждой клети соответственно, чтобы получить требуемую форму профиля. В 6-й клети, где осуществляется переход от 1-го этапа деформации ко 2-му этапу, подгибка центрального ребра осуществляется всего на 5°, что должно снизить значение продольных деформаций на кромках заготовки, угол подгибки α которых в этой же клети составляет 25°. Далее угол α увеличивается на 35° в 7-й клети и после этого формовка крайних кромок проходит с равным шагом 30°.

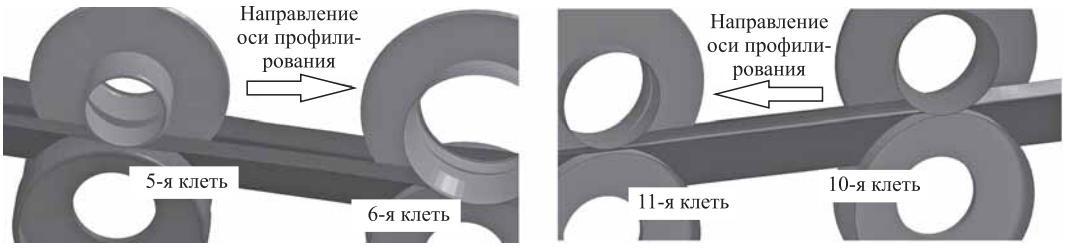
Чтобы убедиться в том, что предложенные изменения калибровки помогут избавиться от волнистости кромки, была актуализирована математическая модель в соответствии с новой геометрией формующих роликов.

По новой модели проведен расчет, и на рис. 9 показана заготовка, полученная в результате решения. Как видно из рис. 9, благодаря модернизации калибровки дефект кромковой волнистости больше не наблюдается.

Также по результатам решения модели был построен график продольной деформации кромки (рис. 10). Из графика видно, что максимальные растягивающие деформации возникают между 3-й и 4-й клетями, но главное отличие от процесса профилирования при исходной калибровке состоит в том, что на всем протяжении формовки практически не

2. Значения углов подгибки в клетях после модернизации, °

Угол подгибки	Номер клети										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
α	0	0	0	0	0	25	60	90	120	150	180
β	16	36	55	75	85	90	90	90	90	90	90
ψ	15	34	51								



а) *б)*

Рис. 9. Модель заготовки:
а — между 5-й и 6-й клетями; *б* — между 10-й и 11-й клетями

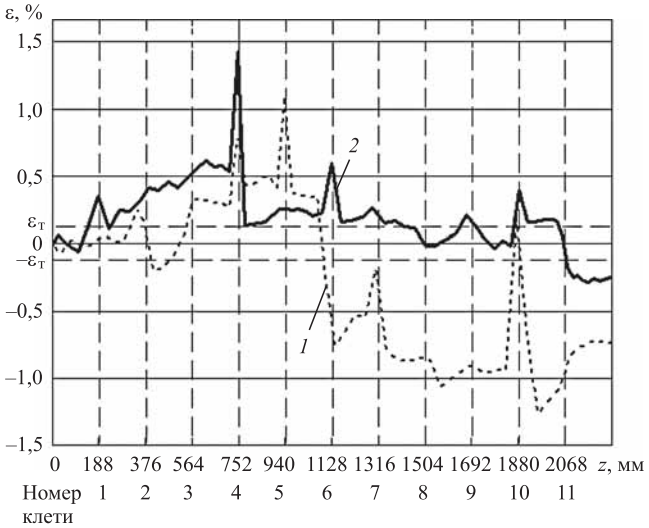


Рис. 10. Графики продольной деформации для исходной (*1*) и модернизированной (*2*) калибровок

возникают сжимающие деформации, которые могли бы привести к потере устойчивости кромки. Это подтверждает взаимосвязь дефекта волнистости с продольными деформациями. Для сравнения эффекта от модернизации калибровки, на рис. 10 штриховой линией также показан график для исходной калибровки.

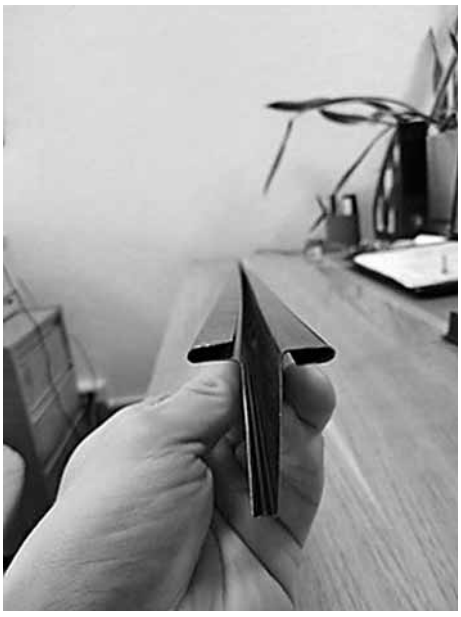


Рис. 11. Готовый профиль

На основании анализа результатов моделирования принято решение изготовить рабочий инструмент. После изготовления роликов и настройки станка был получен профиль, изображенный на рис. 11. Из рис. 11 видно, что дефектов в виде волнистости кромки, а также продольного изгиба и скручивания не наблюдается. Таким образом, задача по проектированию калибровки для производства данного профиля требуемого качества выполнена.

Выводы

1. Применение математического моделирования процесса формовки в роликах позволяет выявить дефекты, возникающие в процессе профилирования.

2. Образование дефекта профиля в виде волнистости кромки связано со знакопеременным характером продольной деформации, который преимущественно определяется углом подгибки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

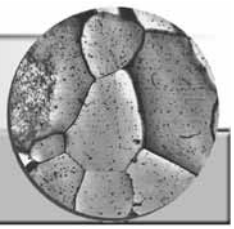
1. **Поворов С.В.** Расчет размеров профиля листовой заготовки в промежуточных переходах при формовке в роликах по заданным режимам // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 12. С. 27—32.

2. **Тришевский И.С., Докторов М.Е.** Теоретические основы процесса профилирования. М.: Металлургия, 1980. 288 с.

3. **Поворов С.В.** Исследование эффекта переформовки, возникающего при профилировании листового металла в роликах // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 10. С. 26—30.

4. **Поворов С.В.** Исследование изменения угла подгибки в процессе роликовой формовки швеллеров двух типов с разными размерами подгибаемых полок при различных режимах формообразования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 2. С. 53—59.

Сергей Владимирович Поворов, канд. техн. наук,
povorovs@bmstu.ru;
Дмитрий Васильевич Егоров;
Дмитрий Сергеевич Волгин



УДК 621.746:621.78

Н.Н. Сергеев[1], А.Н. Сергеев[1], С.Н. Кутепов[1], А.Е. Гвоздев[1], А.А. Шатульский[2], Д.С. Клементьев[1]

([1]Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, [2]Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)

Исследование микроструктуры и механических свойств коррозионно-стойких биметаллов, полученных методом непрерывной разливки*

Исследованы структура и механические свойства двух- (Ст3 + 12Х18Н10Т) и трехслойных коррозионно-стойких (12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т) биметаллов в литом, кованом и прокатанном состояниях. Изучена переходная зона биметаллов, отличающаяся химической и структурной неоднородностью и оказывающая влияние на механические свойства. Показано, что переходные зоны в литом, кованом и прокатанном состояниях в биметалле Ст3 + 12Х18Н10Т имеют различную ширину: наибольшая — в литом состоянии, наименьшая — после ковки. В кованом состоянии в переходной зоне присутствуют рекристаллизованные зерна, что обусловлено неравномерной пластической деформацией. Установлено, что незначительное изменение химического состава стали 12Х18Н10Т в биметаллическом слитке Ст3 + 12Х18Н10Т в плавках № 1 и № 2 практически не влияет на механические свойства.

Ключевые слова: коррозионно-стойкие биметаллы; переходная зона; термическая обработка; поверхность раздела; механические свойства.

The structure and mechanical properties of two- (St3 + 12Kh18N10T) and three-layer corrosion-resistant (12Kh18N10T + St3 + 12Kh18N10T) bimetals in cast, forged and rolled conditions are studied. The transition zone of bimetals, characterized by chemical and structural heterogeneity and influencing mechanical properties, is studied. It is shown that the transition zones in cast, forged and hardened conditions in the bimetal St3 + 12Kh18N10T have different widths: the greatest — in the cast condition, after forging the least. In the forged state in the transition zone there are recrystallized grains, due to uneven plastic deformation. It is found that slight change in the chemical composition of steel 12Kh18N10T in bimetallic ingot St3 + 12Kh18N10T in melts No. 1 and No. 2 practicaly does not affect on mechanical properties.

Keywords: corrosion resistant bimetals; transition zone; heat treatment; interface; mechanical properties.

Введение. Развитие современной техники ставит перед учеными задачи по изысканию новых конструкционных материалов, позволяющих повышать надежность и долговечность, экономичность и технологичность деталей машин и механизмов.

Увеличение эксплуатационных характеристик металлических материалов может быть обеспечено сочетанием двух и более металлов (сплавов), т.е. применением биметаллических и композиционных материалов [1—3].

Для отработки технологии получения биметаллов различных композиций методом непрерывной разливки наибольший интерес представляет изучение зоны контакта двух разнородных сталей. Поскольку от структуры и свойств данной зоны зависят эксплуатационные характеристики всего изделия в целом, взаимодействие составляющих биметалла в процессе его изготовления приводит к возникновению неоднородности различных ви-

*Работа выполнена по федеральной целевой программе "Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы" (уникальный идентификатор проекта RFMEF 157717X0271).

дов вблизи границы раздела и в объемах, прилегающих к ней.

Форма поверхности раздела слоев может иметь существенные различия в зависимости от вида и режимов выбранного технологического процесса получения биметалла. Геометрическая неоднородность чаще всего проявляется в микроскопическом масштабе.

Диффузионные процессы, происходящие при горячей пластической деформации биметалла или при его термической обработке, вызывают структурную неоднородность, связанную с образованием микроскопических участков, имеющих особое субструктурное строение, которые имеют поверхности раздела. Следовательно, биметалл характеризуется наличием внутренних границ, разделяющих составные слои композиций или структурные участки, образующиеся в результате взаимодействия двух металлов.

Различие в химическом составе исходных материалов, зон, образующихся вблизи границы раздела, а также локальная сегрегация легирующих элементов внутри отдельных структурных составляющих приводят к развитию в биметалле химической неоднородности.

Образующиеся в переходной зоне структурные составляющие, отличающиеся неодинаковым строением и составом, различаются между собой по свойствам, что обусловливает механическую неоднородность зоны сопряжения слоев биметаллического соединения.

Особенности строения, состава и свойств переходного слоя влияют на свойства биметалла. Это влияние непостоянно и может изменяться в результате теплового воздействия или механического нагружения.

Цель исследования — изучение структурных превращений, происходящих в приграничных зонах непрерывно-литого коррозионностойкого биметалла и их влияние на механические свойства биметаллического соединения.

Методика проведения исследований. Исследовали структуру и механические свойства двух- и трехслойных коррозионно-стойких биметаллов, полученных методом непрерывной разливки в ПАО "Тулачермет", в различных состояниях (литом, горячекатаном, кованом) и после различных видов термической обработки (закалка, закалка + отпуск). Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 1.

Разливку биметаллов осуществляли с помощью двух кристаллизаторов, расположенных один над другим в вертикальной плоскости. Верхний кристаллизатор предназначен для формирования основного слоя, нижний — для плакирующего. В момент заливки жидкого металла плакирующего слоя происходит подплавление слабоокисленной поверхности закристаллизовавшегося в верхнем слое кристаллизатора основного слитка. При этом происходит частичное смешивание двух жидких составляющих биметалла. Наличие температурного и концентрационного градиентов приводит к активизации диффузионных процессов в приграничных зонах, что обусловли-

1. Химический состав составляющих коррозионно-стойких биметаллов

Составляющая биметалла	Содержание элементов, %							
	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu
Биметалл 12Х18Н10Т + Ст3 (плавка № 1)								
12Х18Н10Т	0,12	0,94	0,008	0,008	0,56	16,60	10,90	0,23
Ст3	0,24	0,39	0,044	0,017	0,15	0,16	0,16	0,14
Биметалл 12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т								
12Х18Н10Т	0,22	1,90	0,024	0,017	0,52	16,53	7,50	—
Ст3	0,15	0,52	0,031	0,014	0,29	0,12	0,07	0,13
Биметалл 12Х18Н10Т + Ст3 (плавка № 2)								
12Х18Н10Т	0,10	1,04	0,016	0,010	1,04	17,75	9,40	0,09
Ст3	0,19	0,49	0,02	0,008	0,16	0,08	0,06	0,09

вает образование в зоне сплавления структуры, отличной от структуры исходных сталей.

Металлографический анализ коррозионностойких биметаллов проводили на микроскопах МИМ-8, ММР-2Р, "Neophot-21" при увеличениях от 60 до 700 крат. Для исследования изменения структуры по ширине слитка последний разрезали на темплеты шириной 40 мм, из которых вырезали образцы по схеме, представленной на рис. 1.

Для определения механических характеристик выполняли испытания на растяжение по ГОСТ 1497—84 образцов для механических испытаний на разрывной машине Р-5. Схема вырезки образцов показана на рис. 2.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 3 приведены микроструктуры трехслойного биметалла 12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т по сечению темплета, вырезанного согласно схеме рис. 1, *а*. Аустенитные зерна литой коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т (см. рис. 3, *а*) имеют вытянутую форму вследствие температурного градиента между сердцевиной и краями темплета, по границам которых располагаются карбиды хрома (см. рис. 3, *а*, *г*). Размер аустенитных зерен неодинаков по ширине

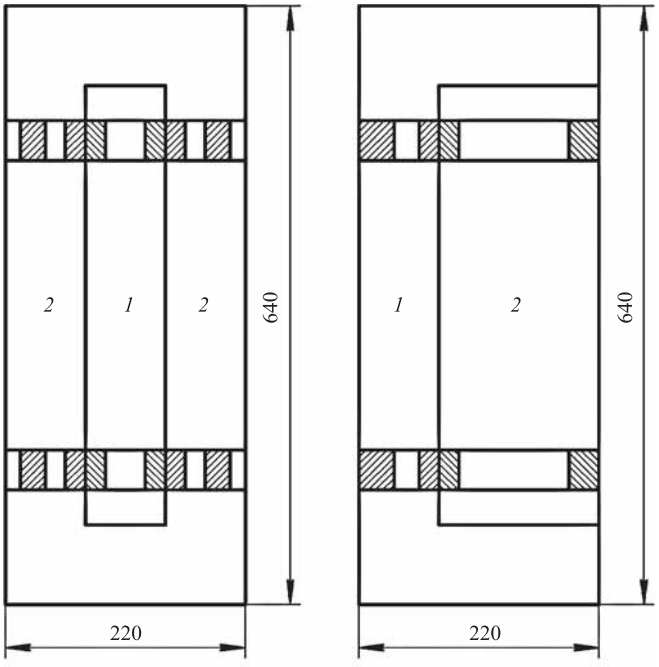


Рис. 1. Схемы вырезки образцов из темплета коррозионностойкого биметалла для металлографических исследований:

а — трехслойный биметалл; *б* — двухслойный биметалл; *1* — основной слой; *2* — плакирующий слой

темплета. По всему полю стали 12Х18Н10Т видно наличие мелких пор. По мере приближения к приграничному слою аустенитные зерна измельчаются и разориентируются (см. рис. 3, *б*, *в*). Сталь Ст3 имеет грубую крупнозернистую структуру, состоящую из участков феррита и перлита. Балл зерна в приконтактной зоне равен 6.

На рис. 3, *б*, *в* показаны микроструктуры зоны контакта 12Х18Н10Т + Ст3. Граница раздела двух разнородных сталей имеет неровный зигзагообразный профиль. Металлографическое исследование шлифов при небольшом увеличении показало на отдельных участках контактной поверхности наличие пор, крупных неметаллических включений сложного состава шаровидной формы, газовых раковин, расположенных преимущественно в структуре коррозионно-стойкой стали (рис. 4).

На рис. 5 и 6 приведены микроструктуры двухслойного биметалла Ст3 + 12Х18Н10Т, соответствующие различным участкам темплета, вырезанным по схеме рис. 1, *б*. Сталь Ст3 в условно принятой верхней части темплета имеет дендритную структуру (см. рис. 5, *а*), характерную для литой стали, в нижней части темплета — видманштеттовую структуру (вытянутые колонии перлита и иглы феррита, расположенные в виде отдельных групп (см. рис. 6, *а*). Структура литой стали 12Х18Н10Т, составляющей двухслойный биметалл, аналогична структуре трехслойного биметалла, представленного на рис. 3, *б*. Граничная зона двухслойного биметалла имеет волнообразный характер. Величина выступов границы по длине темплета неодинакова (см. 5, *б*, *в* и рис. 6, *б*). Приконтактная область характеризуется наличием мелких и крупных пор, раковин и неметаллических включений.

Неоднородность состава зоны контакта связана прежде всего с диффузионным перераспределением углерода, которое происходит в процессе кристаллизации слитка и последующего его охлаждения. Диффузия углерода к границе раздела сталь Ст3 — 12Х18Н10Т подтверждается скоплением перлита у контактной границы со стороны коррозионно-стойкой стали.

Рядом исследователей [4, 5] изучена закономерность перемещения углерода через границу раздела в зоне контакта разнородных сталей и установлено стремление системы к выравниванию концентрации углерода. При этом в об-

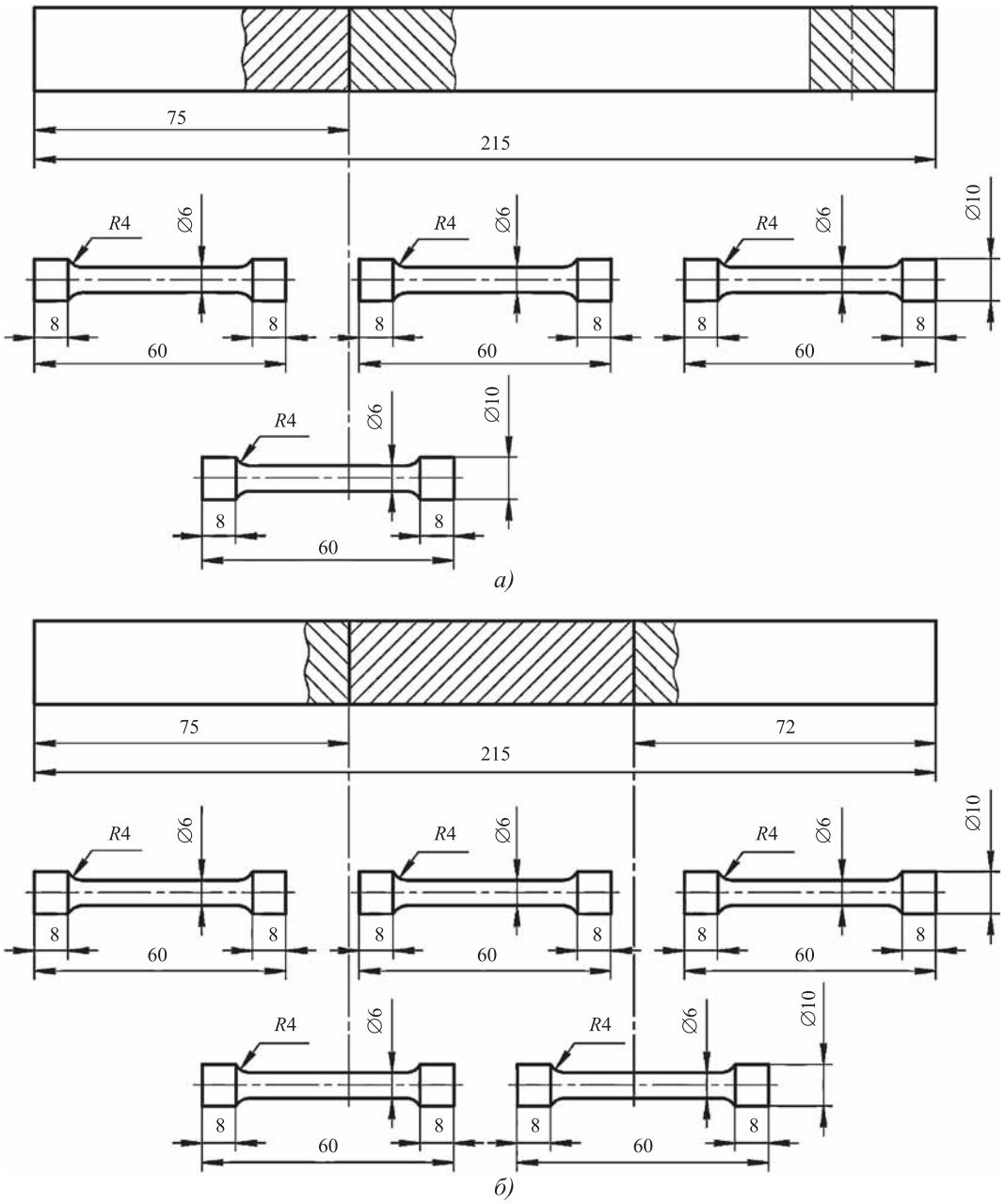


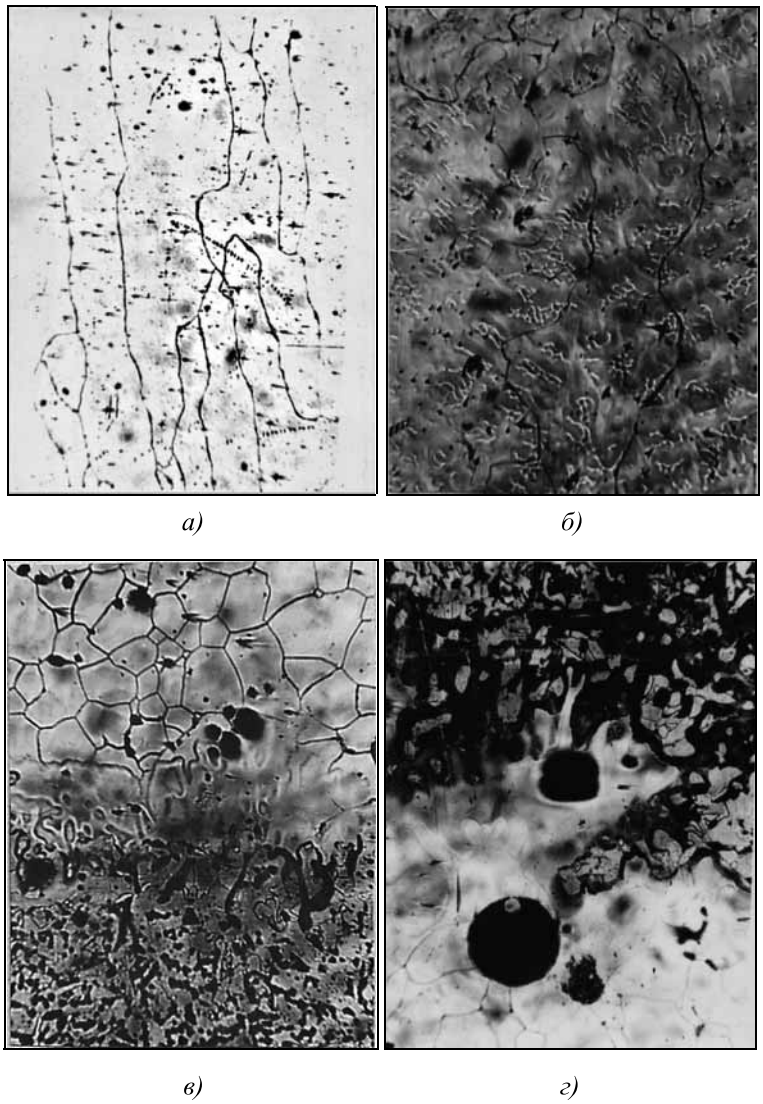
Рис. 2. Схемы вырезки образцов для механических испытаний из темплета двух- (*а*) и трехслойного (*б*) биметаллов

ласти границы раздела создается структурная и химическая неоднородность.

Аналогичная картина перераспределения углерода и его количественная оценка даны в работе [6]. Химическая неоднородность переходного слоя обусловливает, естественно, и структурную неоднородность. Структура малоуглеродистой стали Ст3, состоящая из участков феррита и перлита (см. рис. 5, *а*), переходит в обезуглероженную зону, состоящую практически из феррита (см. рис. 5, *б*). Затем наблюдается область мелкодисперсного перлита, проходящая вдоль всего обезуглероженного слоя (см. рис. 5, *б*).

За мелкодисперсным перлитом следует зона игольчатой структуры, имеющая мартенситную ориентировку, которая переходит в аустенитную структуру коррозионно-стойкой стали (см. рис. 5, *в*).

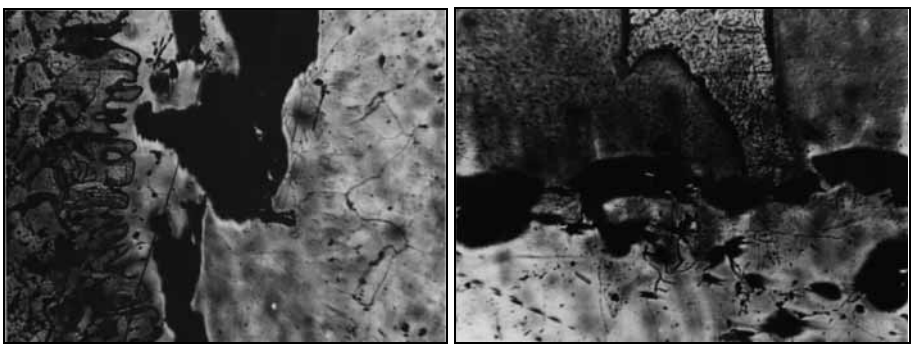
Таким образом, изучение металлографической структуры двух- и трехслойных биметаллов Ст3 + 12Х18Н10Т в литом состоянии показало, что структура по сечению темплета неоднородна, граница раздела двух разнородных сталей имеет волнообразный характер. В зоне контакта много дефектов (раковины, поры, неметаллические включения).



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 3. Микроструктуры биметалла 12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т по сечению темплета (×60):

а, *б* — 12Х18Н10Т; *в*, *г* — зоны контакта 12Х18Н10Т + Ст3



а) *б)*

Рис. 4. Дефектность вдоль соединения биметалла 12Х18Н10Т + Ст3 (×60):

а — зона контакта трехслойного биметалла; *б* — зона контакта двухслойного биметалла

Контактная область двух- и трехслойного биметаллов состоит из переходных зон, обусловленных диффузией углерода к границе раздела из углеродистой стали.

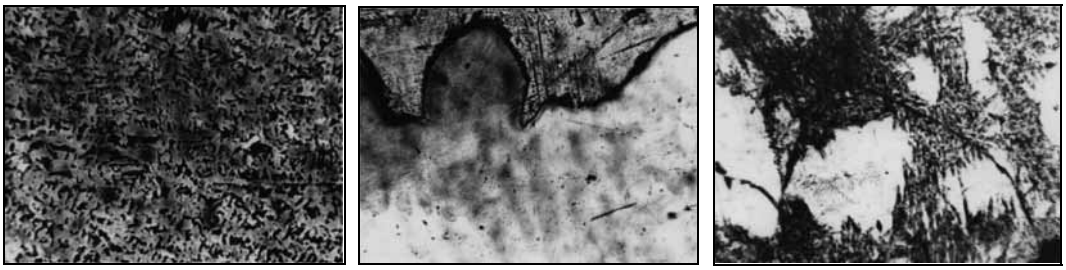
Для полного представления о структуре биметаллов в различных состояниях (литое, после ковки и прокатки) и их свойствах исследования проводили на различных плавках.

Исследовали структуры двухслойного биметалла Ст3 + 12Х18Н10Т в литом, кованом и прокатанном состояниях. При изучении нетравленных шлифов в литом, кованом и прокатанном состояниях в контактной зоне не обнаружено преимущественного расположения металлических включений. На рис. 7 показаны участки структур биметалла Ст3 + 12Х18Н10Т с неметаллическими включениями. В литой стали Ст3 наблюдали силикаты в виде черных шаровидных включений (см. рис. 7, *а*). В кованом и прокатанном состояниях неметаллические включения в стали Ст3 имеют удлиненную форму и располагаются параллельно границе раздела сталей (см. рис. 7, *б*).

При исследовании нетравленной структуры контактной зоны не наблюдали границы между исходными компонентами. Однако на некоторых участках в области коррозионно-стойкой стали имелись микропоры в литом состоянии и микротрещины в прокатанном состоянии.

На рис. 8 приведены микроструктуры зоны соединения двухслойного биметалла в литом, кованом и прокатанном состояниях. Геометрия границы раздела двух разнородных сталей в литом состоянии резко отличается от кованого и прокатанного состояний. Граница раздела в литом состоянии волнообразная с различным шагом и амплитудой волны по всей поверхности соприкосновения.

Зона контакта состоит из структур, характерных для сталей Ст3 и 12Х18Н10Т, между которыми находится переходная зона. Ширина переходных зон в литом, кованом



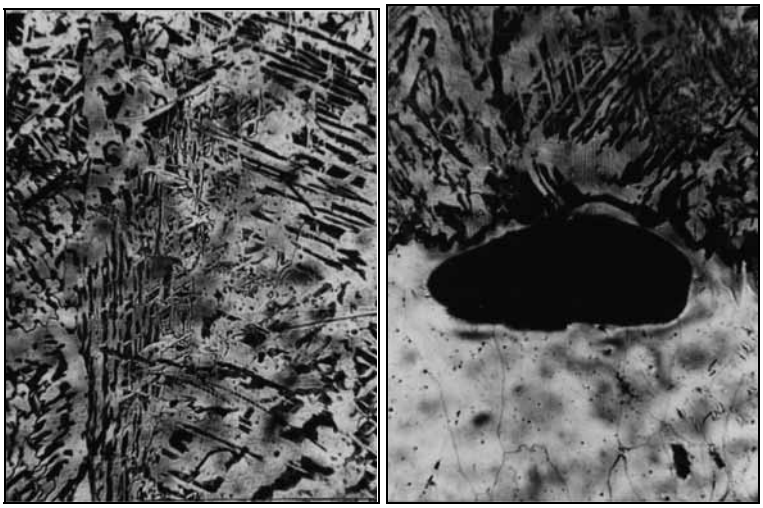
а) *б)* *в)*

Рис. 5. Микроструктуры двухслойного биметалла Ст3 + 12Х18Н10Т (×600):
а — сталь Ст3; *б* — зона контакта Ст3 + 12Х18Н10Т; *в* — переходная зона

и прокатанном состояниях различная (наименьшая — в кованом состоянии).

Литая сталь Ст3 состоит из феррита и перлита. Структура коррозионно-стойкой стали представляет собой крупнозернистый аустенит с карбидами по границам зерен. Зерна аустенита соответствуют 1—2-му баллу. Размер зерен в зоне контакта для стали Ст3 после ковки 6—7-й балл, после прокатки 7—8-й балл, у стали 12Х18Н10Т после ковки 5—6-й балл, после прокатки — 8-й балл.

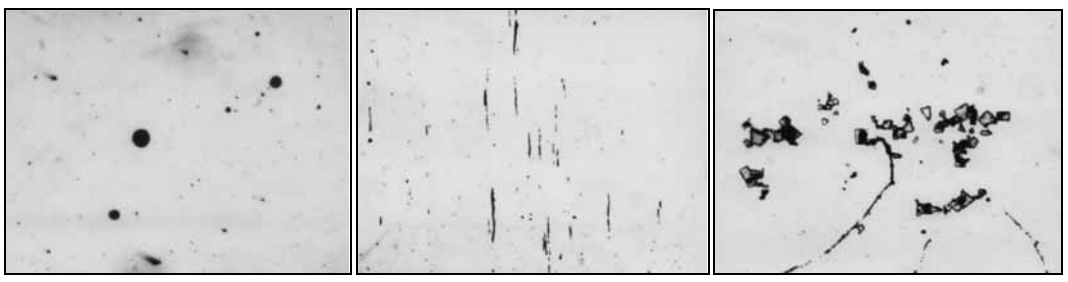
По мере удаления от границы раздела в углеродистой и коррозионно-стойкой стали в кованом состоянии наблюдаются постепенное удлинение зерен и строчечная структура. Вблизи зоны контакта в области коррозионно-стойкой стали в кованом состоянии имеются участки структуры с частичной рекристаллизацией. Крупные зерна окружены мелкими равноосными зернами, что, очевидно, обусловлено малой степенью деформирования объемов, прилегающих непосредственно к границе раздела, так как в зоне максимального обжатия диффузионные процессы при контакте металлов затруднены [7], что подтверждено данными работы [8], в которой показано хорошо подчиняющееся логарифмическому закону уменьшение толщины переходной диффузионной зоны по мере увеличения нагрузок при сжатии нагретых образцов сталей с различным содержанием углерода.



а) *б)*

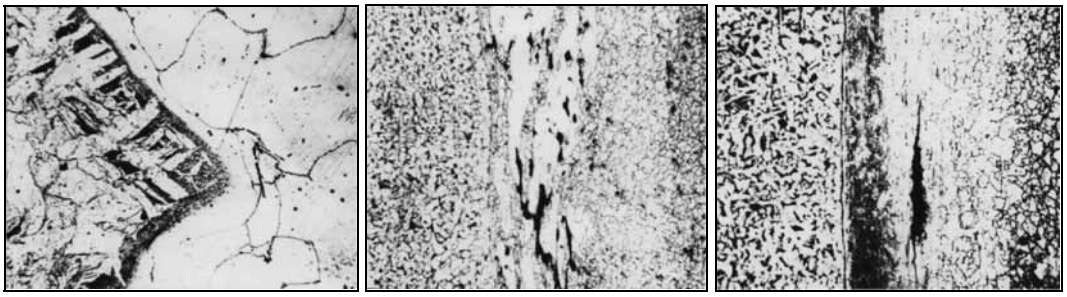
Рис. 6. Микроструктуры двухслойного биметалла Ст3 + 12Х18Н10Т (×60):
а — сталь Ст3; *б* — зона контакта Ст3 + 12Х18Н10Т

По данным [2], в условиях прокатки диффузионные потоки атомов, вызванные



а) *б)* *в)*

Рис. 7. Неметаллические включения в двухслойном биметалле Ст3 + 12Х18Н10Т:
а — ×160; *б* — ×120; *в* — ×340



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Микроструктуры зоны контакта двухслойного биметалла Ст3 + 12Х18Н10Т (×70):
а — литое состояние; *б* — кованое состояние; *в* — после прокатки

воздействием приложенного силового поля, возможны не только в глубинных слоях контактирующих металлов, но и на их стыке. Прокатка, а возможно и ковка способствуют получению диффузионной прослойки в биметалле и обеспечивают качественную связь слоев.

Роль диффузионных процессов при прокатке в установлении прочной связи слоев, по данным авторов [9], проявляется главным образом после выхода горячего листа биметалла из валков и зависит от времени пребывания в условиях высокой температуры. При этом интенсификация диффузионных потоков атомов усиливается под влиянием процессов, обусловливающих дробление зерен, появление вблизи них участков с повышенной концентрацией вакансий, дислокаций и других дефектов строения кристаллической решетки основы и плакирующего слоя.

Установлению прочной связи слоев способствует рекристаллизация, обусловливающая рост зерен, перестройку зон сопряжения контактирующих кристаллитов, а также измельчение и рассеивание частиц окисных пленок. Развитие переходной зоны при совместной пластической деформации двух металлов происходит в результате реакционной диффузии, связанной с появлением новых фаз (например, карбидов хрома) вблизи границ раздела слоев. При этом углерод из основы легко перемещается в сторону плакирующего слоя, содержащего активные карбидообразующие элементы.

Наряду с отмеченной выше миграцией углерода из основы плакирующего слоя микроспектральным анализом обнаружена встречная диффузия хрома и никеля в малоуглеродистую сталь [9]. Следы хрома обнаружены в стали Ст3 на расстоянии 20 мкм от границы раздела, а следы никеля — на расстоянии 5 мкм. Это позволяет утверждать, что образование переходной зоны связано с появлением вблизи границы раздела слоев структурной и химической неоднородности, оказывающей влияние на характер механизма деформации и разрушения биметалла в условиях механического нагружения.

Исследованы механические характеристики коррозионно-стойких биметаллов и их составляющих в литом состоянии (табл. 2 и 3). Значения механических свойств представляют собой средние значения, полученные при испытании пяти образцов. Из анализа табл. 2 и 3 видно, что прочностные и пластические свойства биметаллов несколько меньше средних значений составляющих. Последнее обусловлено тем, что в переходной зоне в литом состоянии присутствуют газовые раковины, поры и неметаллические включения, которые уменьшают механические свойства биметаллов.

Механические свойства составляющих двух- и трехслойных биметаллов отличаются между собой. Поэтому проводили испытания биметаллов нескольких плавок и в различных состояниях (литое, кованое, после прокатки и термической обработки). Механические свойства биметаллов и их составляющих двух плавок в литом состоянии практически не отличаются. В кованом состоянии наблюдается различие между двумя плавками по значениям предела прочности и предела текучести. Механические свойства стыковой зоны Ст3 + 12Х18Н10Т значительно возросли по сравнению с литым состоянием. Горячая пластическая деформация стыковой зоны способствует увеличению ее плотности и выравниванию структурной и механической неоднородности.

Таким образом, качество контактной зоны двух разнородных сталей предопределяет меха-

нические свойства биметалла Ст3 + 12Х18Н10Т (см. табл. 3). В литом состоянии прочность и пластичность этой зоны значительно ниже, чем составляющих биметалла.

Горячая пластическая деформация способствует выравниванию химической и структурной неоднородности переходной зоны во всем ее объеме, залечиванию пор, раковин и других микродефектов, что проявляется в повышении механических свойств стыковой зоны. Прочностные свойства стыковой зоны после ковки приближаются к среднему арифметическому значению составляющих биметаллов.

2. Механические свойства коррозионно-стойких биметаллов и их составляющих в литом состоянии

Биметалл и его составляющие	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ
	МПа		%	
Трехслойный 12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т	413	235	17,0	25,0
12Х18Н10Т	480	253	47,0	55,0
Ст3	480	255	13,0	30,0

3. Механические свойства коррозионно-стойких биметаллов и их составляющих в литом и кованом состояниях

Биметалл и его составляющие	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ
	МПа		%	
Литое состояние (плавка № 1)				
Ст3	390	220	21,0	37,0
12Х18Н10Т	490	240	45,0	62,0
Ст3 + 12Х18Н10Т (стыковая зона)	480	200	11,0	18,0
Литое состояние (плавка № 2)				
Ст3	400	240	24,0	48,0
12Х18Н10Т	410	270	30,0	51,0
Ст3 + 12Х18Н10Т (стыковая зона)	380	220	12,0	18,0
Кованое состояние (плавка № 1)				
Ст3	380	300	34,0	69,0
12Х18Н10Т	620	460	33,0	56,0
Ст3 + 12Х18Н10Т (стыковая зона)	470	330	10,0	19,0
Кованое состояние (плавка № 2)				
Ст3	440	260	33,0	70,0
12Х18Н10Т	670	480	41,0	57,0
Ст3 + 12Х18Н10Т (стыковая зона)	490	350	9,0	17,0
После прокатки				
Ст3	450	360	27,0	49,0
12Х18Н10Т	440	290	35,0	44,0

О прочности и качестве сцепления основного слоя Ст3 с плакирующим 12Х18Н10Т можно судить по касательным линиям среза, которые определяли на образцах по ГОСТ 10885—85. При испытании на срез горячекатаного листа толщиной 15 мм прочность стыковой зоны составила 230 МПа. Для определения влияния диффузионных процессов на механические характеристики стыковой зоны образцы подвергали отжигу при температуре 600 °С с различной длительностью до 20 ч. Прочность образцов на срез после термической обработки возросла до 300 МПа. Такое увеличение прочности связано не только с диффузией углерода, но и с перераспределением легирующих элементов Cr и Ni между сталями 12Х18Н10Т и Ст3. Этот процесс приводит к образованию и укрупнению карбидов в теле зерна и по границам, что неизбежно должно вызвать снижение пластичности. Диффузия углерода в коррозионно-стойкую сталь также может привести к снижению ее коррозионной стойкости.

Исследование механических свойств биметалла 12Х18Н10Т + Ст3 показало, что переходная зона между углеродистой и коррозионностойкой сталью оказывает существенное влияние на прочность сцепления слоев. Нагрев и последующая деформация уменьшают ширину этой зоны, химическую и структурную неоднородность, что увеличивает механические свойства биметалла.

Выводы

1. Биметалл Ст3 + 12Х18Н10Т имеет зигзагообразную границу раздела в литом состоянии. В граничной зоне коррозионно-стойкой стали обнаружены поры, раковины и неметаллические включения.

2. Переходные зоны в литом, кованом и прокатанном состояниях в биметалле Ст3 + 12Х18Н10Т имеют различную ширину: наибольшая — в литом состоянии, наименьшая — после ковки. В кованом состоянии в переходной зоне присутствуют рекристаллизованные зерна, что обусловлено неравно-

мерной пластической деформацией. Качество переходной зоны (наличие дефектов, химическая неоднородность) значительно влияет на прочность сцепления слоев биметалла.

3. Незначительное изменение химического состава стали 12Х18Н10Т в биметаллическом слитке (Ст3 + 12Х18Н10Т) в плавках № 1 и № 2 практически не влияет на механические свойства.

Полученные результаты можно использовать при создании ресурсосберегающих технологий термомеханической, химико-термической, антикоррозионной, термической, лазерной обработки металлических систем (металлов, цветных сплавов, сталей традиционного слиткового передела и порошкового производства, наноструктурных материалов) в различных условиях и состояниях и аддитивных технологий [10—20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Король В.К., Гильденгорн М.С.** Основы технологии производства многослойных металлов. М.: Металлургия, 1970. 238 с.

2. **Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н.** Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.

3. **Быков А.А.** Развитие производства биметаллов // Металлург. 2009. № 9. С. 61—64.

4. **Герасименко И.Н.** О миграции углерода в биметалле и сварных соединениях разнородных сталей // Физика металлов и металловедение. 1960. Т. 9. С. 83—85.

5. **Лившиц Л.С.** Перемещение углерода в альфа-железе и растворимость углерода в феррите // Металловедение и термическая обработка металлов. 1959. № 9. С. 49—53.

6. **Голованенко С.А., Меандров Л.В.** Производство биметаллов. М.: Металлургия, 1966. 304 с.

7. **Свенсон К.** Физика высоких давлений. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 367 с.

8. **Лозинский М.Г.** Тенденции развития и области применения высокотемпературной металлографии / Новые направления развития высокотемпературной металлографии: сб. М.: Машиностроение, 1970. 168 с.

9. **Лозинский М.Г., Тананов А.И.** Образование переходной зоны в биметалле Ст3 + Х18Н10Т и ее роль в развитии деформации при последующем тепловом и механическом нагружении // Известия вузов. Черная металлургия. 1968. № 10.

10. **Особенности** работы, процессы упрочнения, структура, свойства и качество стальных зубчатых колес привода агрегатов двигателей внутреннего сгорания / А.П. Навоев, А.А. Жуков, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 212 с.

11. **Mechanism** of the hydrogen cracking of metals and alloys, part I (review) / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, S.N. Kutepov, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 24—31.

12. **Закономерности** формирования структуры частиц порошковых композиций на основе алюминия, получаемых механическим реакционным легированием / В.Н. Гадалов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, И.В. Ворначева, С.Н. Кутепов, Е.А. Ельников, Д.С. Алымов, Д.И. Нестеров // Материаловедение. 2019. № 7. С. 38—42.

13. **Grain** size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low- and medium-carbon low-alloy steels / A.E. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Vol. 6. No. 1. P. 41—44.

14. **Длительная** прочность арматурной стали 22Х2Г2АЮ при испытаниях на коррозионное растрескивание в кипящем растворе нитратов / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Н. Сергеев, А.Г. Колмаков, В.В. Извольский, А.Е. Гвоздев // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 8. С. 33—39.

15. **Multiparametric** optimization of laser cutting of steel sheets / A.E. Gvozdev, I.V. Golyshev, I.V. Minayev, A.N. Sergeyev, N.N. Sergeyev, I.V. Tikhonova, D.M. Khonelidze, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Vol. 6. No. 4. P. 305—310.

16. **Синтез** и триботехнические свойства композиционных покрытий с матрицей из полиимида ПМ-ДАДФЭ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Материаловедение. 2015. № 12. С. 36—40.

17. **О состоянии** предпревращения металлов и сплавов / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

18. **О фрикционном** взаимодействии металлических материалов с учетом явления сверхпластичности / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.М. Хонелидзе // Материаловедение. 2016. № 8. С. 21—25.

19. **Пластическая** дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.

20. **Расчет** кластерной структуры расплава, ее влияние на образование наноаморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, А.В. Афанаскин, Е.А. Гвоздев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 6. С. 12—16.

Николай Николаевич Сергеев, д-р техн. наук;
Александр Николаевич Сергеев, д-р пед. наук;
Сергей Николаевич Кутепов, канд. пед. наук;
Александр Евгеньевич Гвоздев, д-р техн. наук;
Александр Анатольевич Шатульский, д-р техн. наук,
shatulsky@rsatu.ru;
Денис Сергеевич Клементьев

А.Г. Колесников
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

К 70-летию кафедры "Оборудование и технологии прокатки" МГТУ им. Н.Э. Баумана. История одного портрета

Я учился в МВТУ им. Н.Э. Баумана с 1964 по 1970 г. на кафедре "Машины-автоматы и прокатное производство". По окончании был оставлен на этой кафедре, где и служу по сей день. Кафедрой в то время руководил выдающийся ученый XX в., создатель современной теории прокатки и знаменитый конструктор металлургического оборудования академик Александр Иванович Целиков. Нам молодым было известно, что нашу кафедру основал Александр Иванович в 1949 г. и этого было достаточно, чтобы испытывать гордость за такую удачу в собственной инженерной биографии. Об академике А.И. Целикове известно достаточно много, подробно описаны его биография и достижения, многое происходило на наших глазах. С течением времени от "стариков" узнавали, что кафедра берет начало с 1934 г., потом был перерыв и в 1949 г. благодаря усилиям Александра Ивановича кафедра вновь возрождена в МВТУ. Тогда мы, молодые, не придавали значения этим подробностям. Для нас ощущение причастности к научной школе "бауманских" прокатчиков во главе с такой масштабной личностью, как А.И. Целиков, было главным и это придавало больше собственной значимости. Вместе с тем на кафедре была галерея рисованных портретов "Основоположники кафедры", среди которых был портрет А.Г. Зиле. Что это был за человек, какова его судьба и почему он среди основоположников нашей кафедры — эти вопросы не обсуждались моим поколением кафедральных сотрудников. Вот что удалось прояснить к сегодняшнему дню.

В 1931 г. в стране произошло событие огромного государственного значения — пуск первого отечественного мощного блюминга. До революции в России работало 11 блюмингов, производительность которых составляла 200...300 тыс. т слитков в год. Производительность Ижорского блюминга была 850 000...1 млн т слитков в год. Дореволюционные блюминги весили 300...500 т; первый советский блюминг — 1650 т.

Проходят масштабные празднества, выпускаются памятные значки, марки, плакаты и даже папиросы "Блюминг".

Макет первого советского блюминга на Театральной площади в Москве

Журнал "Крокодил", значки, марки, папиросы, посвященные первому советскому блюмингу

Высокими правительственными наградами был отмечен трудовой подвиг многих рабочих, сумевших в рекордно короткие сроки изготовить и успешно запустить столь мощное и технически сложное оборудование. В отношении конструкторов первого советского блюминга узнаем из статьи председателя ВСНХ СССР Г.К. Орджоникидзе "Кто сконструировал и технически руководил постройкой первого советского блюминга", опубликованной в газете "Правда" 23 мая 1931 г.:

"*Мы хотели здесь сказать несколько слов о тех, кто является техническим вдохновителем и техническим руководителем производства первого мощного советского блюминга на Ижорском заводе. Страна должна знать их имена. Конструкторами и техническими руководителями производства блюминга на Ижорском заводе были инженеры: Неймайер, Тихомиров, Зиле и Тилле. Надо прямо сказать, что они являются техническими творцами этого большого дела.*

Эти инженеры, как и многие другие из старого инженерства, года два назад дали себя завлечь Рамзиным и очутились в рядах врагов советской власти, в рядах агентов империалистических интервентов. За это они были арестованы ОГПУ. Они признали свою вину и изъявили готовность всем своим знанием пойти на службу к советской власти.

Инженеры Неймайер, Тихомиров, Зиле и Тилле охотно взялись за это дело и первую часть своего обещания выполнили. Теперь дело за установкой его и пуском. Как только эта вторая часть работы будет успешно закончена, ВСНХ СССР поставит вопрос перед правительством о полном освобождении этих инженеров и соответствующем их награждении".

Первый советский блюминг. Надписи на станине: "Ижорский завод", "Особое конструкторское бюро № 3 при ОГПУ"

ОКБ № 3. Строители блюмингов. 17/X 1931 г.:
слева направо:

Вильгельм Августович Тилле, Карл Францевич Неймайер, Николай Леонидович Мануйлов, Арвед Генрихович Зиле

После пуска блюмингов на Ижорском и Макеевском заводах А.Г. Зиле вместе со своими товарищами был восстановлен в правах. К тому времени острая нехватка инженеров на металлургических заводах привела к необходимости открыть в Московском механико-машиностроительном институте (ММИ) им. Н.Э. Баумана (так тогда называлось МВТУ) кафедру прокатно-волочильного производства. Из Приказа по учебным заведениям НАРКОМТЯЖПРОМА СССР № 26/28 от 28 января 1934 г. следует:

"— Установить в Московском Механико-Машиностроительном институте им. БАУМАНА кафедру прокатно-волочильного производства.

— Руководителем кафедры утвердить инженера Зиле А.Г.".

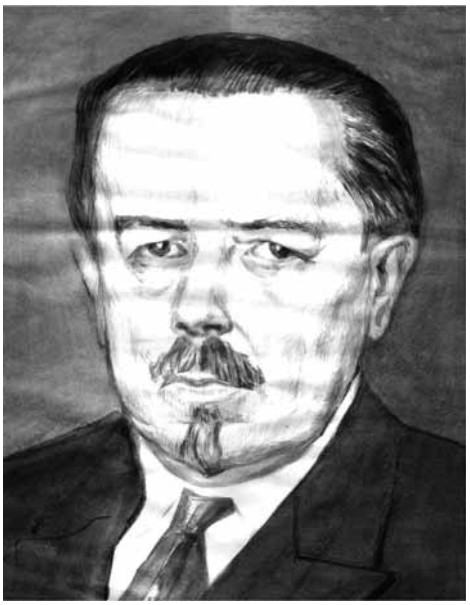
Состав преподавателей кафедры прокатки на 1937/1938 учебный год выглядел следующим образом:

1. Зиле А.Г. проф. — без нагрузки;
2. Целиков А.И. и.о. проф. — 480 ч.

Вне штата:

1. Зарощинский М.Л. и.о. доц.
2. Мануйлов Н.Л. и. о. доц.
3. Ланге Б.Л. и.о. доц.
4. Струве Е.П. и.о. доц.
5. Гржебовский С.С. и.о. доц.
6. Нилков Н.А. и.о. доц.
7. Маркелов В.В. асс. аспир.
8. Королев А.А. асс. аспир.

В числе преподавателей мы находим одного из участников создания первого советского блюминга Николая Леонидовича Мануйлова.



Арвед Генрихович Зиле (1878—1938)

Арвед Генрихович Зиле 1878 года рождения, уроженец хутора Карлова, Лифляндской губернии. Окончил Рижский политехнический институт и четыре курса по судостроению в г. Данциге (Германия). По специальности инженер-судостроитель. После окончания института работал на Краматорских заводах в конструкторском бюро.

История этих заводов относится к 1898 г., когда на базе Краматорского металлургического общества, учрежденного немецкой машиностроительной компанией "В. Фицнер и К. Гампер", были сданы в эксплуатацию две первые доменные печи по выплавке чугуна. В 1920 г. после национализации предприятие переименовано в "Краматорский государственный машиностроительный и металлургический завод (КГММЗ)".

С 1907 г. А.Г. Зиле работает на Коломенском машиностроительном заводе в разных должностях: конструктором Судостроительного бюро, с 1915 по 1919 гг. — заведующим Отделом судостроения завода. С 1924 г. назначен заместителем директора по технической части Коломенского завода, с ноября 1929 г. — заведующим отделом оборудования ГОМЗЫ (Государственные объединенные машиностроительные заводы — трест, находился в ведении ВСНХ СССР, организован в 1918 г.).

В 1930 г. он был арестован ОГПУ вместе с рядом известных инженеров В.А. Тилле, К.Ф. Неймайером, Н.Л. Мануйловым и В.А. Тихомировым. Они были обвинены и приговорены к заключению от пяти до десяти лет в концлагерь за участие в "контрреволюционной вредительской организации по металлопромышленности СССР", а затем направлены в Особое конструкторское бюро № 3 ОГПУ для срочной работы по созданию первого советского блюминга. Здесь, вместе с К.Ф. Неймайером, В.А. Тихомировым и В.А. Тилле, А.Г. Зиле участвует в конструировании и техническом сопровождении изготовления блюминга на Ижорском заводе.

Вместе со своими товарищами А.Г. Зиле был восстановлен в правах и с 1934 по 1937 г. заведовал кафедрой прокатно-волочильного производства в МММИ им. Н.Э. Баумана.

В 1936 г. на Новокраматорском машиностроительном заводе возникла серьезная проблема, связанная с созданием первого не только в СССР, но и в Европе, слябинга 1100. На заводе не хватало опытных конструкторов, практически не было технической документации, приходилось ориентироваться на "картинки" и опыт инженеров, побывавших в прокатных цехах американских предприятий, литературные источники. В помощь были привлечены создатели первого советского блюминга Вильгельм Августович Тилле и Арвед Генрихович Зиле, который возглавил технический отдел. Не имея исследовательской и экспериментальной базы, реверсивный четырехвалковый слябинг спроектировали в крайне сжатые сроки. В его проект внесли много конструктивных идей, существенно отличающих его от подобных прокатных машин в США.

После смерти председателя ВСНХ СССР Г.К. Орджоникидзе в 1937 г. последовали новые репрессии в отношении бывших сотрудников Особого конструкторского бюро № 3 при ОГПУ. Повторно А.Г. Зиле арестован 7 января 1938 г. На момент ареста он проживал в г. Краматорск Донецкой области и работал там Главным конструктором на машиностроительном заводе имени Сталина. Арестован по обвинению в том, что он "являлся агентом разведки иностранного государства". По постановлению Комиссии при НКВД СССР и Прокурора СССР от 9 февраля 1938 г. А.Г. Зиле приговорен к высшей мере наказания — расстрелу. (Данных о дате расстрела нет.) Впоследствии военный трибунал Московского военного округа от 23 сентября 1957 г. отменил постановление Комиссии НКВД СССР и Прокурора СССР от 9 февраля 1938 г. и дело было прекращено за отсутствием состава преступления. 10 апреля 1989 г. заключением Прокуратуры СССР А.Г. Зиле был реабилитирован.

Александр Григорьевич Колесников, д-р техн. наук,
agk@bmstu.ru

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2019 г.

Чукин М.В., Корчунов А.Г., Тулупов О.Н. Международные проекты Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова . . . . № 6

Литейное и сварочное производства

Булычев В.В., Зыбин И.Н., Парамонов С.С. Исследование процесса рельефной приварки гаек к оцинкованной листовой стали . . . . . № 10
Вальтер А.И., Протопопов А.А., Корбанов В.Д. Исследование теплообмена между стальной отливкой и чугунным кокилем при его заполнении . . . . . № 8
Вдовин К.Н., Дерябин А.В., Позин А.Е., Подосян А.А., Юсин А.Н. Стойкость кристаллизаторов МНЛЗ . . . . . № 6
Гулевский В.А., Цурихин С.Н., Барабанов С.В., Кидалов Н.А. Исследование пенометалла с пропиткой медного каркаса алюминием . . . . . № 5
Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Крюков Р.Е., Осетковский И.В. Влияние введения вольфрама и хрома на свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe—C—Si—Mn—Mo—Ni—V—Co . . . № 2
Егоров Р.В., Овчинников В.В. Электронно-лучевая сварка деталей из алюминиевых деформируемых сплавов. . . . . № 11
Ерофеев В.А., Страхова Е.А. Оценка вероятности соответствия показателей качества шва заданным допускам при разработке технологии сварки . . . . . № 8
Зарубин А.М., Зарубина О.А. Математическое описание рабочего процесса механизма прессования для литья под давлением. . . . . № 1
Изотов В.А., Родионова Н.А., Федулова Ю.С. Определение коэффициента расхода нижней литниковой системы при литье черных сплавов по газифицируемым моделям . . . . . № 2
Изотов В.А., Родионова Н.А., Федулова Ю.С. Оценка влияния конфигурации полости форм на охлаждение фронта потока расплава при получении тонкостенных отливок из стали методом литья по газифицируемым моделям. . . . . № 7
Илларионов И.Е., Пестряева Л.Ш., Садетдинов Ш.В., Моисеева О.В. Влияние фосфатоборатных соединений на физико-механические свойства фурановой смеси. . . . . № 8
Кидалов Н.А., Осипова Н.А., Поташова И.Е., Рыбальченко К.О. Использование хромитового песка в холодно-твердеющих формовочных смесях для No-bake-процесса . . . . . № 11
Кидалов Н.А., Осипова Н.А., Поташова И.Е., Рыбальченко К.О., Лысоченко В.В. Холодно-твердеющие смеси для No-bake-процесса . . . . . № 3
Колпаков В.В., Чайкин А.В., Чайкин В.А., Вдовин К.Н. Инновации в проектировании и производстве тележек грузовых вагонов и отливок для них . . № 7
Колпаков В.В., Чайкин А.В., Чайкин В.А., Вдовин К.Н. Совершенствование технологии выплавки стали 110Г13Л методом переплава . . . . . № 4
Кукарцев В.А., Капошко И.А., Кукарцев А.В. Технология производства синтетического чугуна, обеспечивающая эффективность изготовления отливок . . . . № 12
Лебедев В.А., Голобородько Ж.Г., Драган С.В. Влияние параметров плазмообразующей среды с добавлением воды на образование пор в швах при автоматической сварке судостроительных сталей. . . . № 1
Лебедев В.А., Голобородько Ж.Г., Драган С.В. Опыт применения источников питания разных типов для плазменной резки в судостроении . . . . . № 9
Лукашик К.А., Бурцев Д.С., Пономарев А.А., Солохненко В.В. Развитие представлений о формировании точности отливок, получаемых литьем в формы из холоднотвердеющих смесей. . . . . № 9
Морозов В.П., Романов Ю.Г. Влияние влаги, содержащейся в порошке, на сопротивляемость образованию горячих трещин при лазерной наплавке. . . . . № 4
Овчинников В.В., Курбатова И.А., Якутина С.В., Лукьяненко Е.В. Металлические включения в швах алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием . . . . . № 3
Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И., Крюков Р.Е., Попова М.В. Сравнительный анализ абразивной износостойкости металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe—C—Si—Mn—Ni—Mo—W—V и Fe—C—Si—Mn—Cr—Ni—Mo—V . . . № 5
Семеноженков М.В., Семеноженков В.С. Экспериментальные исследования влияния схем технологического силового воздействия на прочность сварного соединения . . № 1
Соловьева И.В., Овчинников В.В., Давыденко Л.В. Исследование свариваемости жаропрочных алюминиевых сплавов 1150 и 1151 в условиях сварки плавлением . . . № 7
Чайкин А.В., Колпаков В.В., Чайкин В.А., Вдовин К.Н. Инновации при выплавке сталей в кислых печах . . . . . № 10
Шапарев А.В., Савин И.А. Влияние содержания кислорода в технологическом газе на качество и скорость лазерной резки листовых заготовок из малоуглеродистых сталей . . . . . № 12
Шекшеев М.А., Михайлицын С.В., Сычков А.Б., Ширяева Е.Н., Шеметова Е.С. Разработка сварочных электродов с композитным наномодифицирующим покрытием . . . . . № 6

Кузнечно-штамповочное производство

Барышников М.П., Ишимов А.С., Барышникова А.М. Физическое и математическое моделирование реологических свойств в процессах горячей пластической деформации с учетом динамической рекристаллизации с использованием комплекса Gleeble 3500 . . . . . № 6
Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Петров П.А., Бач Ву Чонг, Степанов Б.А. Определение рациональных режимов осадки с кручением заготовок титана ВТ1-0 с применением метода активного эксперимента . . . . . № 5
Воронцов А.Л., Балахонцева Н.А. Проблемы изготовления ступенчатых втулок с помощью вытяжки по внутренней поверхности . . . . . № 9
Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Экспериментальная проверка возможностей холодной объемной штамповки стаканов из конструкционных сталей . . . . . № 12
Долгополов М.И., Евсюков С.А. Исследование гибки тонкостенных труб с узкозональным градиентным нагревом . . . . . № 2

Егоров М.С., Егорова Р.В. Пластичность композиционных материалов с определением температурных режимов горячей штамповки, исключающих появление дефектов в структуре материала . . . . . № 2
Еронько С.П., Смирнов Е.Н., Ткачев М.Ю., Ковалева О.А. Механические ножницы для качественной резки тонкостенных труб на заготовки . . . . . № 11
Карпов С.М. Теоретическое и экспериментальное исследование свободной осадки трубной заготовки . . № 10
Лавриненко В.Ю., Изикаева А.И. К вопросу стойкости штоков ковочных и штамповочных молотов . . . . . № 7
Лавриненко В.Ю., **Лавриненко Ю.А., Говоров В.А.** Критерии выбора и рационального применения материалов для высокопрочных крепежных деталей в автомобильной промышленности . . . . . № 1
Ларин С.Н., Кухарь В.Н. 80 лет кафедре "Механика пластического формоизменения" Тульского государственного университета . . . . . № 11
Ларин С.Н., Пасынков А.А., Бессмертная Ю.В. Исследование силовых режимов при многооперационной вытяжке с локальным пластическим деформированием . . . . № 11
Назарян Э.А., Арзоян Т.А. Исследование процесса деформирования трубчатых заготовок методом гидроформовки . . . . . № 10
Назарян Э.А., Арзоян Т.А. Моделирование процесса формоизменения трубчатых заготовок гидромеханическим деформированием . . . . . № 3
Петров А.Н., Киселев М.Р. Исследование смазочных материалов на основе полимеров для процессов горячего деформирования . . . . . № 5
Рассудов Н.В., Головкин С.А. Технологическая схема процесса получения бездефектной структуры на лопатках из титановых сплавов. . . . . № 9
Семёнов И.Е. Экспериментально-аналитическое определение характеристик армированных полиуретанов . . . . . № 12
Семёнов И.Е., Иванов А.В. Аналитическое решение процесса закрытой прошивки неосесимметричных деталей методом баланса работ . . . . . № 8
Складчиков Е.Н., Гаврилов В.С. Двухкоординатный перекладчик для кривошипного горячештамповочного пресса . . . . . № 4
Трегубов В.И., Ларин С.Н., Пасынков А.А., Нуждин Г.А. Оценка влияния геометрии инструмента на силовые параметры совмещенного процесса вытяжки и отбортовки . . . . . № 4
Филиппов Ю.К., Глазунов Д.А. Исследование параметров формообразования при холодной высадке стержневых деталей с прямоугольной в плане головкой. . . . . № 8
Чудин В.Н., Черняев А.В., Булычев В.А. Изотермическая прошивка патрубков с наклонным фланцем . . . . № 3
Шибаков В.Г., Панкратов Д.Л., Хайруллин Р.А., Панкратов Д.Д., Низамов Р.С., Низамова Л.М. Обоснование требований к точности заготовки для прецизионной штамповки шестерен . . . . . № 7

Прокатно-волочильное производство

Абрамова Н.Б. Определение зависимости твердости от интенсивности деформации и температуры медных образцов для гильз кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок . . . . . № 11
Арюлин С.Б., Лобурь Е.В., Сухоставский М.Н. Теоретическое определение энергосиловых параметров деформации алюминиевой полосы на маятниковом прокатном стане . . . . . № 1
Гурьянов Г.Н. Характер влияния параметров деформации на осевое напряжение и оптимальный угол волочения проволоки из материалов с разными кривыми упрочнения. Часть 1. Прирост осевого напряжения от контактного трения, противонатяжения и деформации сдвига материала проволоки в зависимости от угла волочения. . . . № 5
Гурьянов Г.Н. Характер влияния параметров деформации на осевое напряжение и оптимальный угол волочения проволоки из материалов с разными кривыми упрочнения. Часть 2. Оптимальный угол волочения как результат взаимного влияния на осевое напряжение контактного трения и деформации сдвига проволоки на входе и выходе рабочего конуса волоки . . . . . № 7
Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Ризаханов Р.Р. Изготовление прутков и проволоки из стружки силумина с использованием прямой горячей экструзии цилиндрических брикетов . . . . . № 4
Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Ливинцова М.Г. Исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке . . . . . № 8
Лехов О.С., Лисин И.В., Билалов Д.Х. Нагруженность и напряжения в бойках установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из дюралюминия. . . . . № 2
Лисовенко Д.С., Полякова М.А., Столяров А.Ю., Гулин А.Е., Никитенко О.А. Особенности контактного взаимодействия высокоуглеродистой проволоки с волокой при комбинировании волочения с кручением . . . . . № 8
Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. Методика расчета параметров правки листового проката на роликовой правильной машине с роликами различного диаметра . . . № 4
Малаканов С.А., Железков О.С., Славин В.С. Моделирование процесса редуцирования-проталкивания при формировании шестигранного профиля из заготовки круглого сечения . . . . . № 10
Николаев В.А., Солодовник В.И., Васильев А.Г. Износостойкость волочильного инструмента различной конструкции. . . . . № 3
Овчинников А.С., Логинов Ю.Н. Особенности формирования свойств проволоки из свинцовой латуни без передела горячей обработки . . . . . № 10
Пивоварова К.Г., Гун Г.С., Корчунов А.Г. Влияние технологических свойств смазочных материалов на качество поверхности калиброванной стали при волочении . . . № 6
Поворов С.В., Егоров Д.В., Волгин Д.С. Производства специального профиля из листовой заготовки методом формовки в роликах для изготовления наборных теплообменных панелей . . . . . № 12
Соколова О.В., Моисеев А.А., Лепестов А.Е. Компьютерное моделирование валковой формовки труб. . . . № 12
Терентьев Д.В., Платов С.И., Жиркин Ю.В., Козлов А.В., Славин В.С. Повышение ресурса тяжелонагруженных узлов машин и агрегатов металлургического производства . . . . . № 6
Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Сметнёва Н.Ю. Состояние и направления развития волочения проволоки в монолитных волоках . . . . . № 9

Материаловедение и новые материалы

Волков А.М., Шестакова А.А., Карашаев М.М., Бакрадзе М.М. Влияние давления при горячем изоста-

тическом прессовании на свойства гранулируемого жаропрочного никелевого сплава . . . . . № 2
Гервасьев М.А., Пономарева М.И. Повышение пластичности при одновременном увеличении прочности Cr—Ni—Mo-сталей в результате изотермической обработки . . . . . № 5
Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Гуреева М.А., Овчинников В.В. Влияние микролегирования кальцием на литейные свойства, структуру и технологичность слитков сплава В-1341 . . . . . № 10
Денисов С.В., Брайчев Е.В., Стеканов П.А., Полецков П.П., Гущина М.С., Никитенко О.А. Разработка режимов термической обработки толстолистового проката из криогенной низкоуглеродистой никелевой стали. . . . . № 6
Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А., Пономарев И.А., Маталасова А.Е. Влияние термической обработки на дюрометрические свойства и фазовый состав стали Н8Г6М3ФТБ, полученной наплавкой порошковой проволокой . . . . . № 7
Жуков А.А., Навоев А.П. Методика выбора температурно-временных режимов двухступенчатой низкотемпературной цементации зубчатых колес привода агрегатов двигателей внутреннего сгорания . . . . . № 4
Калашников И.Е., Болотова Л.К., Кобелева Л.И., Михеев Р.С., Подымова Н.Б. Исследование структуры и свойств антифрикционных материалов на базе сплава баббита Б83 . . . . . № 1
Лопатина Ю.А., Задорожний Р.Н., Карпухин С.Д. Исследование формы и морфологии поверхности частиц порошков, полученных методом электроэрозионного диспергирования из отходов меди и сплавов на ее основе . . . . . № 8
Морозова Е.А., Морозов А.П., Муратов В.С. Влияние комбинированных воздействий на сопротивление усталости алюминиевых сплавов систем Al—Cu—Mg—Mn и Al—Zn—Cu—Mg. . . . . № 4
Морозова Е.А., Морозов А.П., Муратов В.С. Влияние термической и поверхностной деформационной обработок на сопротивление усталости сплава ЭИ698 . . . . № 7
Оглодков М.С., Пахомова С.А., Климкина А.А. Влияние переходных металлов на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов системы Al—Mg—Si . . . . . № 3
Панина К.С., Курганова Ю.А., Николюкин Ю.В. Моделирование структуры и расчет компонентного состава материала электродов сильноточной вакуумной и плазменной электроники . . . . . № 9
Романов Д.А., Московский С.В., Соснин К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Филяков А.Д., Протопопов Е.В. Повышение свойств медного электрического контакта за счет его обработки плазмой, сформированной при электрическом взрыве фольги серебра с навеской порошка оксида цинка . . . . . № 11
Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Шатульский А.А., Клементьев Д.С. Исследование микроструктуры и механических свойств коррозионно-стойких биметаллов, полученных методом непрерывной разливки . . . . . № 12
Фукс М.Д., Минякин Н.А., Фролов М.А. Влияние технологии регламентных работ на долговечность высокотемпературного оборудования из сплавов Х25Н35 . . . № 3
Фукс М.Д., Фролов М.А. Влияние фазового состава на жаростойкость конструкционных сплавов Fe—25Cr—35Ni . . . . . № 5
Швеева Т.В., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Склонность сталей к образованию трещин при закалке в растворах полимера . . . . . № 6

Информация

Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Батурин А.А., Гойдо М.Е. Производство гидравлических устройств для прессового оборудования, работающего на воде и водной эмульсии . . . . . № 3
Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Гордин Д.Э. Изготовление отверстий в заготовках из титанового сплава ОТ4-1 методом термосверления . . . . . № 1
Горбунова Ю.Д., Горяев А.И., Кузнецов А.Ф., Орлов Г.А. Оценка качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием комплексных показателей . . . . . № 1
Гун И.Г., Вахитов А.Р., Гун Е.И., Калмыков Ю.В., Сальников В.В. Разработка конструкции и технологии производства внутренних рулевых наконечников автомобиля. . . . . № 6
Колесников А.Г. К 70-летию кафедры "Оборудование и технологии прокатки" МГТУ им. Н.Э. Баумана. История одного портрета . . . . . № 12
Лавриненко В.Ю., Батышев К.А., Семенов К.Г. Международная научно-техническая конференция "Инновационные технологии в литейном производстве" в МГТУ имени Н.Э. Баумана . . . . . № 8
Муратов В.С., Хамин О.Н. Получение отливок и деформированных заготовок из алюминиевых сплавов под операции их поверхностной обработки . . . . . № 2
Петров П.А., Шпунькин Н.Ф. 75 лет кафедре "Обработка материалов давлением и аддитивные технологии" Московского политехнического университета . . . . . № 2
Сварка. Гибридная лазерно-дуговая сварка сталей, никеля и никелевых сплавов. Уровни качества для дефектов по ГОСТ ISO 12932—2017 . . . . . № 10, № 11
Скрипка В.Л., Минязева Л.Х. Особенности измерительных сигналов при фазохронометрической диагностике главного привода прокатного стана . . . . . № 8
Третьяков А.Ф. Применение металлических пористых материалов для изготовления изделий с заданными свойствами. . . . . № 9
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2019 г. . . . № 12
Шибаков В.Г., Шибаков Р.В., Панкратов Д.Л., Фролов А.М. Восстановление эксплуатационных свойств шаровых пальцев автомобилей пластической деформацией. . . . . № 5

ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 10.10.2019. Подписано в печать 02.12.2019. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.