ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Том 15 № 11 ноябрь 2017

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.
БОГАТОВ А.А., д.т.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.
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.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., 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.

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

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

Гущин В.Н., Ульянов В.А., Курилина Т.Д., Гладких И.В. Исследование параметров центробежного литья массивных стальных бандажей 483
Лебедев В.А., Голобородько Ж.Г., Драган С.В. Влияние плазмохимических процессов в воздушно-водяной плазме на насыщение кромок реза азотом и образование пор при сварке 489

Кузнечно-штамповочное производство

Кошелев О.С., Чесноков Е.В. Компьютерное моделирование процесса изготовления конических обечаек на двухвалковой листогибочной установке 494
Галкин В.В., Братухин А.В., Гаврилов Г.Н., Иванов С.В. К вопросу низкой стойкости пуансонов при выдавливании крестообразного шлица в винтах с потайной головкой из стали 14Х17Н2 497
Глинер Р.Е., Катюхин Е.Б., Пряничников В.А. К определению энергетических характеристик сопротивления металла деформациям 503

Прокатно-волочильное производство

Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Применение высокочастотных установок при формировании структурно-механических свойств сортового проката 509

Материаловедение и новые материалы

Хлыбов А.А., Кувшинов М.О. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя аустенитной стали 12Х18Н10Т 515
Глебов В.В., Блинов В.М. Коррозионно-механические свойства стали 05Х22АГ14Н7М 520

Информация

Татарских Б.Я., Федоров О.В. Проблемы и перспективы развития заготовительных производств в машиностроении 523

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней, в базу данных Chemical Abstracts

Журнал выходит при содействии:
Академии проблем качества Российской Федерации; Министерства образования и науки Российской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прессов; ЦНИИЧермета; ВНИИМЕТМАШа; ИМЕТ РАН; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; АО "НПО "Сплав"

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2017

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Vol. 15 № 11 November 2017

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.
BOGATOV A.A.
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.
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.
SHATUL'SKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
ÖHLUND E.
TUTMANN T.

This issue prepared with assistance of specialist
SERIKOVA E.A.

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

Gushchin V.N., Ul'yanov V.A., Kurilina T.D., Gladkikh I.V. Study of parameters of centrifugal casting of massive steel bands 483
Lebedev V.A., Goloborod'ko Zh.G., Dragan S.V. Effect of plasma-chemical processes in air-water plasma on saturation of cut edges by nitrogen and formation of pores during welding 489

Forging and Stamping Production

Koshelev O.S., Chesnokov E.V. Computer modeling of obtaining process of conical shells on two-roll sheet bending machine 494
Galkin V.V., Bratukhin A.V., Gavrilov G.N., Ivanov S.V. To question of low durability punches at extrusion of Philips slot in countersunk screws from 14Kh17N2 steel 497
Gliner R.E., Katyukhin E.B., Pryanichnikov V.A. To determination of energy characteristics of metallic resistance to deformations 503

Rolling and Drawing Production

Filippov A.A., Pachurin G.V. Application of high-frequency units at formation of structural and mechanical properties of bar 509

Physical Metallurgy and New Materials

Khlybov A.A., Kuvshinov M.O. Effect of ultrasonic impact treatment on structure and properties of surface layer of austenitic steel 12Kh18N10T 515
Glebov V.V., Blinov V.M. Corrosion-mechanical properties of steel 05Kh22AG14N7M 520

Information

Tatarskikh B.Ya., Fedorov O.V. Problems and perspectives of development of blanking productions in mechanical engineering 523

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses, 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", 2017

УДК 621.745

В.Н. Гущин, В.А. Ульянов, Т.Д. Курилина, И.В. Гладких
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Исследование параметров центробежного литья массивных стальных бандажей

Рассмотрены критерии выбора и методы определения скорости заливки при центробежном изготовлении стальных бандажей валковых дробилок. Исследованы технология суспензирования заливаемого расплава и ее влияние на механические свойства литых заготовок. Приведены результаты математического и физического моделирования процессов заполнения формы и затвердевания расплава.

Ключевые слова: стальной бандаж; центробежное литье; скорость заливки; частота вращения; инокуляторы.

Selection criteria and methods for determining of casting rate at centrifugal production of cast massive steel bands are considered. Suspending poured melt technology and its influence on the mechanical properties of cast billets are studied. The results of mathematical and physical modeling of mould filling and solidification of the melt are presented.

Keywords: steel band; centrifugal casting; casting rate; frequency of rotation; inoculators.

Повышение требований к эксплуатационной стойкости бандажей валковых дробилок обусловливает необходимость изготовления бандажей из перспективных материалов, обладающих высокими механическими свойствами и абразивной износостойкостью, делает необходимым дальнейшее усовершенствование технологии их центробежного литья и оборудования для ее осуществления, разработки мероприятий для увеличения экономичности этого способа изготовления.

Центробежные отливки отличаются повышенными механическими свойствами литого металла. При этом значительные технико-экономические преимущества центробежного литья достигаются вследствие экономии металла, энергоносителей и продолжительности производственного цикла.

Исследовали стальные бандажи валковых дробилок с черновой массой 11,2 т (рис. 1). Бандажи из стали 150ХНМЛ можно применять в валковых дробилках. Сталь 150ХНМЛ является заэвтектоидной, легированной хромом, никелем, молибденом. Хром в сочетании с углеродом обеспечивает высокую износостойкость, никель и молибден — высокие механические свойства.

Центробежное литье по сравнению с литьем в неподвижные формы для этих типов отливок имеет следующие преимущества [1]:

- плотную структуру;
- в меньшей степени загрязнение неметаллическими включениями (в изломе отливки редко встречаются шлаковый или песчаный засор и газовые раковины);

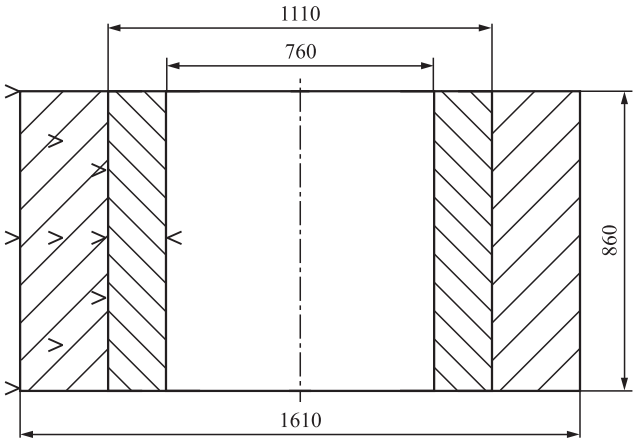


Рис. 1. Типовые размеры валка и расположение термопар на физической модели

- отсутствие литниковой системы, что увеличивает выход годного до 90...95 %;
- увеличение производительности, условия труда лучше, чем при литье в разовые формы;
- возможность изготовления двухслойных (биметаллических) отливок [1—4].

Для повышения износостойкости бандажей применяют:

- совершенствование марочного состава;
- инокуляторы в виде порошков карбидов, нитридов, боридов и др. [3, 5] или микрохолодильники того же состава, что и отливка;
- флюсы, шлаки, позволяющие уменьшить образование плен, сократить брак и уменьшить припуски;
- защитные покрытия металлических форм и их охлаждение [1—3].

Как показывает практика, при правильно организованном режиме под действием центробежной силы расплав равномерно распределяется по внутренней поверхности формы и, кристаллизуясь, образует полую или цельную отливку. Центробежным способом можно получить двухслойные заготовки, что достигается поочередной заливкой в форму различных сплавов. Кристаллизация расплава в металлической форме под действием центробежной силы обеспечивает получение плотных отливок, повышение физико-химической однородности, предотвращение ряда литейных дефектов, но не решает всех проблем с качеством литья, в частности, распространенности такого дефекта макроструктуры, как транскристаллизация, образования продольных трещин на наружной поверхности.

Проведенные на физических моделях исследования позволили усовершенствовать существующую технологию изготовления бандажей с помощью оптимизации выбора параметров: частоты вращения, угла наклона металлической формы, режимов и методов нанесения теплоизоляционных покрытий, заливки расплава и введения дисперсных инокуляторов. От частоты вращения формы зависят плотность отливки, ее механическая прочность, однородность состава по радиальному сечению, степень удаления шлаковых включений от наружной поверхности отливки к внутренней и правильность формы свободной поверхности отливки [4, 6].

Определение условий заливки. Как правило, в практике работ по центробежному литью минимальной и достаточной частотой вращения формы считают ту, которая обеспечивает правильную свободную поверхность отливки. Эта частота будет различной и зависит она от расположения оси, состава металла, допустимой разнотолщинности для полой отливки и ее размеров.

Большинство методов расчета частоты вращения формы сводятся к трем основным видам расчета: по заданной скорости вращения, по гравитационному коэффициенту и по давлению на форму. Рядом исследователей предложены эмпирические и полуэмпирические формулы расчета скорости вращения формы [2, 3].

Нижний предел частоты вращения при литье полых заготовок с горизонтальной осью вращения определяют следующим условием: заливаемый металл во время первого оборота вокруг оси должен получить ускорение, превышающее g. Невыполнение этого условия приводит к "дождеванию" металла при заливке в форму. Наиболее известным способом расчета частоты вращения формы является расчет по коэффициенту гравитации.

Коэффициент гравитации K зависит от вида формы и заливаемого сплава. Для металлической формы $K = 80$, а искомая частота вращения формы в секунду

$$n = 0,705\sqrt{K/D}, \qquad (1)$$

где D — диаметр формы, м.

Температура нагрева изложницы перед заливкой металлом, футеровка изложницы и

способ заливки металла в форму влияют на формирование центробежных отливок и их качество. Предварительный подогрев изложницы снижает тепловой удар при заливке металла, способствует лучшему распределению металла по диаметру и длине, повышению качества наружной поверхности отливок и снижению брака по отбелу при литье чугуна. Перед заливкой металла форму после нанесения огнеупорного покрытия необходимо подогреть до 200...400 °С.

Огнеупорное покрытие уменьшает скорость и степень нагрева изложниц при их заливке металлом, а также снижает скорость охлаждения отливок, что предотвращает образование трещин при литье стали и отбела при литье чугуна [4].

Для металлических центробежных форм наиболее распространены огнеупорные покрытия из сыпучих материалов (обычно из сухого кварцевого песка). Благодаря большой частоте вращения изложницы такое покрытие наносится ровным слоем на ее стенку, удерживается на ней и не размывается струей горячего металла. В последнее время применяют футеровки из песчано-смоляной смеси. Расход фенолоформальдегидной смолы составляет всего 2,5 % от массы песка [6].

Разнотолщинность теплоизоляционной засыпки ограничивали по длине бочки 0,5...1,0 мм при толщине слоя для бандажа 5...8 мм. В этих условиях наиболее рациональны следующие характеристики разливки:

- нанесение теплоизоляционной засыпки с самотвердеющими связующими при горизонтальном положении формы и частоте вращения бандажа 540 об/мин;
- для внешнего слоя бандажа: угол наклона 0°; частота вращения не ниже 380 об/мин; средняя скорость заливки 50 кг/с; перегрев стали до 100 °С;
- для внутреннего слоя (обычно из другого стального сплава): угол наклона к горизонту 0°; частота вращения не ниже 420 об/мин; скорость заливки 50 кг/с; перегрев стали не выше 50 °С.

Верхний предел перегревов связан со свариваемостью внешнего и внутреннего слоев отливки. Как показали промышленные эксперименты, для хорошей свариваемости слоев не следует проводить заливку второго слоя при температурах внутренней поверхности первого слоя ниже ликвидуса более чем на 50...70 °С.

Скорость заливки металла влияет на качество наружной поверхности отливки и заполнение формы и зависит от критической частоты вращения формы. Подачу металла в начале заливки рекомендуется ускорить, чтобы металл быстрее распределился по всей поверхности формы. В этом случае неслитины и спаи на поверхности отливки не образуются.

При разработке технологического процесса центробежного литья необходимо учитывать плотности первично выпадающих фаз в интервале кристаллизации и остающегося маточного раствора. В тех случаях, когда плотность первично выпадающей фазы меньше плотности жидкости, необходимо обеспечить минимальные скорость литья, температуру металла и формы для обеспечения направленной кристаллизации.

Для устранения дефектов, связанных с повышенной окисленностью мениска внешнего слоя, скоростью вхождения струи, отрабатывали технологию челночной подачи по длине бочки расплава, подачи расплава через безнапорный стакан в две или более струй (рис. 2). В обоих случаях разливку первых слоев осуществляли в защитной атмосфере, что позволило практически избавиться от брака по пленам и заворотам.

Суспензионная заливка. Для дальнейшего увеличения стойкости поверхностного слоя, снижения расхода металла и повышения выхода годного, в том числе за счет снижения припусков на механическую обработку, на физической модели опробовали технологию суспензирования заливаемого расплава. Использовали два варианта суспензирования: ввод дисперсных инокуляторов на наклонный заливочный желоб (см. рис. 2, *а*) и путем вдувания аргоном дисперсных инокуляторов (микрохолодильников) через боковые фурмы в струи безнапорного стакана (см. рис. 2, *б*). Данная схема была успешно применена при изучении центробежного литья прокатных валков [7].

Исследования проводили на математических и физических моделях с проверкой в промышленных условиях. Данные о скоростных и температурных полях, полученные на физических моделях, позволили провести расчеты массы инокуляторов и времени ее расплавления. Для максимального воздействия

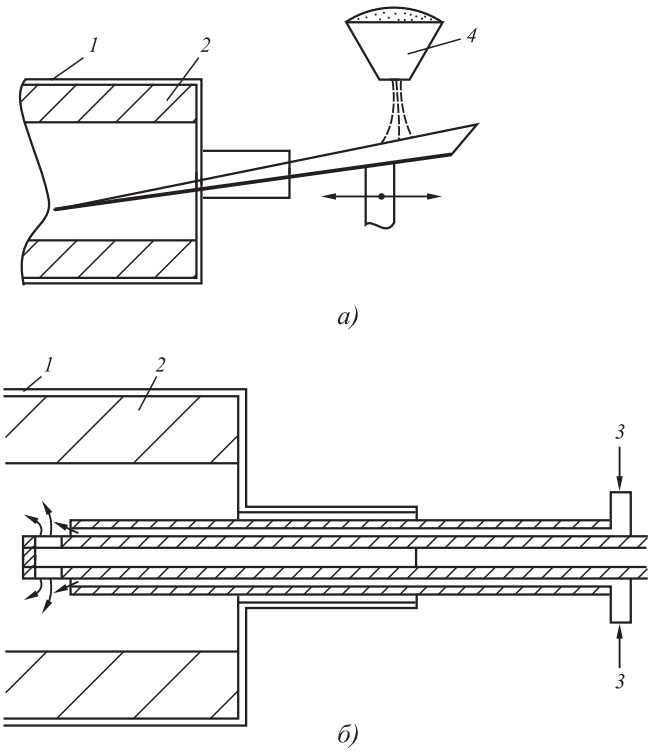


Рис. 2. Способы подачи суспензированного расплава:
а — лотком; *б* — безнапорным стаканом с вдуванием инокулятора в боковые струи; *1* — форма; *2* — отливка; *3* — подача инокулятора с аргоном; *4* — ковш

дисперсных инокуляторов (микрохолодильников) на повышение механических свойств литого металла, как показала практика, важно, чтобы расплавление частицы — холодильника происходило до момента, когда средняя температура затвердевающих отливок достигает температуры начала затвердевания. В большинстве случаев границы раздела между инокулятором и матрицей расплава при неполном его расплавлении является нежелательным фактором [8].

Теплофизические свойства твердых и жидких сталей взяты из справочников. Результаты некоторых расчетов приведены в табл. 1.

Расчетная методика [7], как и большинство других [6, 8], не учитывает при расчетах неравномерность распределения в объеме жидкого металла частиц инокулятора, спекания их при вводе, а также тепловые потери при разливке и прогреве формы.

Результаты исследований на физических моделях с коррекцией на промышленный эксперимент свидетельствуют о благоприятном влиянии ввода дисперсного инокулятора (экзогенных добавок) в наружные слои на теплофизические параметры формирования бандажа и валка и их макроструктуру в количестве 2,5...5,5 % соответственно при использовании теплоизолирующих покрытий толщиной 5...8 мм.

На основании полученных данных рекомендуется применять способ ввода дисперсных инокуляторов (экзогенных добавок), например, инертным газом в боковые струи безнапорного стакана через охлаждаемые фурмы, что позволяет стабилизировать процесс разливки и подачи инокулятора; повысить полноту усвоения вводимого порошка; создать в зоне разливки безокислительную атмосферу; получить более мелкодисперсную с мини-

1. Результаты расчета времени плавления и количества вводимого инокулятора в наружный слой бандажа

Температура заливки $t_з$, °С	Радиус частицы инокулятора r, мм	Эффективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_ж$, Вт/(м^2·К)	Время плавления частицы $\tau_{пл}$, с	Средняя температура расплава $t_{\Delta т}$, °С	Количество вводимого инокулятора m, %
1550	0,15	8454	0,85	1549	2,6*
	0,30		1,70	1549	
	0,50		2,85	1548	2,4...2,7**
	1,00		5,69	1546	
1600	0,15	10 655	0,47	1600	5,4*
	0,30		0,93	1600	
	0,50		1,55	1599	5,2...6,0**
	1,00		3,10	1598	

* Моделирование для фракций 0,15 мм.
** Экспериментальные значения.

мально развитой зоной столбчатых кристаллов структуру разливаемого слоя.

Большая равномерность распределения и полнота усвоения дисперсного инокулятора достигаются в результате:

- челночной подачи расплава и инокулятора по длине бандажа;
- теплоизоляционной засыпки толщиной 5...8 мм;
- горизонтальной разливки первого и второго слоев при частотах вращения, не превышающих технологически минимальных, 380...400 и 420...440 об/мин соответственно;
- ввода дисперсных инокуляторов с размером фракций не более 0,3...0,6 мм;
- подачи инокулятора к мениску настильными струями в сторону вращения, с минимально возможными скоростями входа последних в слой вращающегося расплава;
- избегания ввода тугоплавких соединений с плотностью, значительно превышающей плотность заливаемого расплава;
- отказа от ввода дисперсных инокуляторов с последними порциями расплава;
- перехода от экзогенного к эндогенному литью при приготовлении суспензии в промежуточном устройстве.

На рис. 3 приведены результаты исследований на физической модели по влиянию количества вводимого инокулятора на время затвердевания первого слоя бандажа, а также кинетики затвердевания второго слоя с наличием засыпки и без нее.

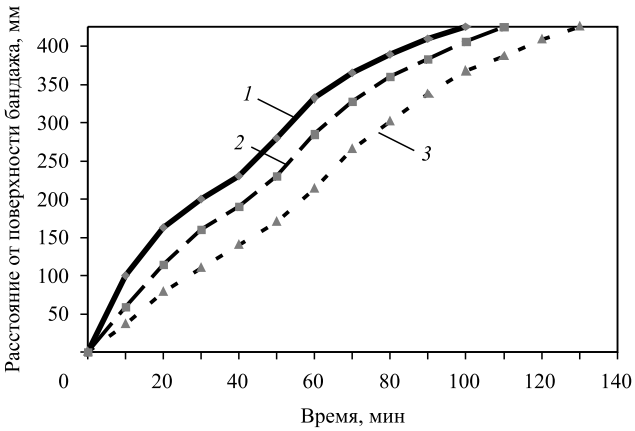


Рис. 3. Кинетика нарастания корки по центру бандажа:

1 — 5 % инокулятора, толщина теплоизоляционного покрытия 8 мм; *2* — без инокулятора и теплоизоляционного покрытия; *3* — без инокулятора с теплоизоляционным покрытием толщиной 8 мм

Ввод 5 % инокулятора при разливке бандажа с толщиной теплоизоляционного покрытия 8 мм способствует:

- ликвидации зоны транскристализации первого слоя;
- снижению времени затвердевания первого слоя на 26...30 %;
- повышению предела прочности и ударной вязкости поверхностного слоя бандажа на 12...17 % с падением твердости на всю глубину рабочего слоя 6...7 НВ.

В табл. 2 приведены результаты исследования на физических моделях влияния ряда параметров разливки на ширину зоны равноосных кристаллов при толщине 250 мм внешнего слоя бандажа.

2. Влияние параметров разливки на размеры зоны равноосных кристаллов в наружном слое бандажа

Количество дисперсных инокуляторов[1], %	Ширина зоны равноосных кристаллов, %	Толщина теплоизолирующей засыпки[2], мм	Ширина зоны равноосных кристаллов, %	Частота вращения формы[3], об/мин	Ширина зоны равноосных кристаллов, %	Интенсивность охлаждения формы[4], Вт/(м^2·К)	Ширина зоны равноосных кристаллов, %
0	14	0	14	400	79	100	82
1,0	25	2	19	500	74	200	81
2,0	33	3	24	600	70	250	75
3,0	59	4	38	—	—	300	68
5,5	81	8	49	—	—	350	59

[1] Толщина засыпки 8 мм, частота вращения 400 об/мин, интенсивность охлаждения 200 Вт/(м^2·К).
[2] Без дисперсных инокуляторов, частота вращения 400 об/мин, интенсивность охлаждения 200 Вт/(м^2·К).
[3] Толщина засыпки 8 мм, интенсивность охлаждения 200 Вт/(м^2·К), 5 % дисперсных инокуляторов.
[4] Толщина засыпки 8 мм, частота вращения 400 об/мин, 5 % дисперсных инокуляторов.

3. Механические свойства контрольных и опытных отливок

Способ введения инокулятора	Механические свойства					
	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ	ψ	*KC*U, МДж/м^2	НВ
	МПа		%			
Контрольный	480	610	1,9	1,8	0,4	249
Вдувание экзогенного инокулятора:						
1 %	494	687	2,0	1,9	0,45	251
2 %	502	707	2,0	2,0	0,52	259
3 %	525	780	2,2	2,1	0,58	271
Ввод эндогенного инокулятора:						
4 %	531	795	2,1	2,1	0,62	277
5 %	542	814	2,4	2,3	0,80	285

Заключение. Анализ современного вальцелитейного производства и соответствующей научной литературы выявил, что исследования по разработке теоретических и практических основ получения литых бандажей из сталей необходимы для каждого конкретного типоразмера, химического состава и способа изготовления.

Проверку разработанной технологии суспензирования проводили на центробежнолитых бандажных кольцах массой 2,5 т из стали 60 ГТС с толщиной стенок 150 мм при вводе до 5 % экзогенного и эндогенного инокуляторов в трехтонном ковше с помощью вдувания экзогенных инокуляторов и охлаждаемых волноводов.

Полученные расхождения (8...12 %) с результатами моделирования по макроструктуре не опровергают тенденцию в улучшении практически всех показателей литого металла, в том числе и механических свойств (табл. 3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Влияние** технологических параметров на время затвердевания бандажа при изготовлении валков центробежным способом / А.Ф. Миляев, Д.Н. Иванов, С.В. Цыбров и др. // Литейные процессы. 2006. Вып. 6. С. 124—129.

2. **Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А.** Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков. М.: Металлургия, 1991. 216 с.

3. **Хрычиков В.Е., Хитько А.Ю., Ковалев А.В.** Модифицирование чугунных прокатных валков: регион. межвузов. сб. науч. трудов // Системные технологии. 2005. № 5 (40). С. 52—55.

4. **Упрочнение** поверхностных слоев при формировании полой заготовки методом центробежного литья / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, А.Н. Аникеев, Р.Р. Гарифулин // Электрометаллургия. 2010. № 1. С. 33—35.

5. **Сабуров В.П., Еремин Е.Н., Черепанов А.Н.** Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 212 с.

6. **Вдовин К.Н., Ячиков И.М., Цыбров С.В.** Совершенствование технологии центробежного литья рабочего слоя прокатных валков // Литейное производство. 2009. № 3. С. 15—16.

7. **Гущин В.Н., Ульянов В.А., Курилина Т.Д.** Выбор параметров центробежного литья прокатных валков // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 4. С. 147—153.

8. **Особенности** структуры перспективных материалов для валков горячей прокатки / В.В. Пашинский, А.Д. Рябцев, В.В. Горбатенко, Е.Г. Пашинская // Сталь. 2003. № 5. С. 73—75.

Вячеслав Николаевич Гущин, д-р техн. наук;
Владимир Андреевич Ульянов, д-р техн. наук;
Татьяна Дмитриевна Курилина;
Инна Васильевна Гладких, канд. техн. наук,
mto@nntu.nnov.ru

УДК 621.791.948

В.А. Лебедев *(Институт электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев),*
Ж.Г. Голобородько *(Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова),*
С.В. Драган *(Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев)*

Влияние плазмохимических процессов в воздушно-водяной плазме на насыщение кромок реза азотом и образование пор при сварке

Описана методика исследования плазмохимических процессов с добавлением воды в плазмотрон и показано, что при резке конструкционной стали за счет связывания азота продуктами высокотемпературной диссоциации воды газонасыщение кромок снижается. Для подавления пор, вызываемых азотом при сварке, достаточно наличия в плазме 0,25 мольных долей водяного пара.

Ключевые слова: плазменная резка; диссоциация воды; газонасыщение кромок; пористость сварных швов.

Technique for studying of plasma-chemical processes with the addition of water to plasmatron is described and it is shown that when cutting of structural steel due to nitrogen binding by products of high-temperature water dissociation, the gas saturation of the edges decreases. To suppress pores caused by nitrogen during welding, it is sufficient to have 0.25 mole fractions of water vapor in the plasma.

Keywords: plasma cutting; water dissociation; gas saturation of edges; porosity of welded joints.

В корпусообрабатывающих цехах судостроительных предприятий для изготовления деталей из листового проката широко применяют технологию плазменной резки на стационарных машинах с ЧПУ типа "Кристалл", оснащенных плазмотронами различных конструкций.

В частности, для резки корпусных сталей на заводах Юга Украины используют плазмотроны с добавкой небольшого количества воды к плазмообразующему газу для снижения образования пор при сварке по кромкам после плазменной резки.

Вода, поступающая внутрь канала наружного сопла плазмотрона (рис. 1), частично испаряясь, создает плазмообразующую среду, в которой протекают плазмохимические реакции связывания азота с получением продуктов, нерастворимых в кромках реза.

Вместе с тем вода обжимает и уплотняет плазменную струю в канале сопла, обеспечивая более высокие энергетические характеристики плазмы. Вследствие этого повышается и качество реза: поверхность становится гладкой, серебристого цвета, неперпендикуляр-

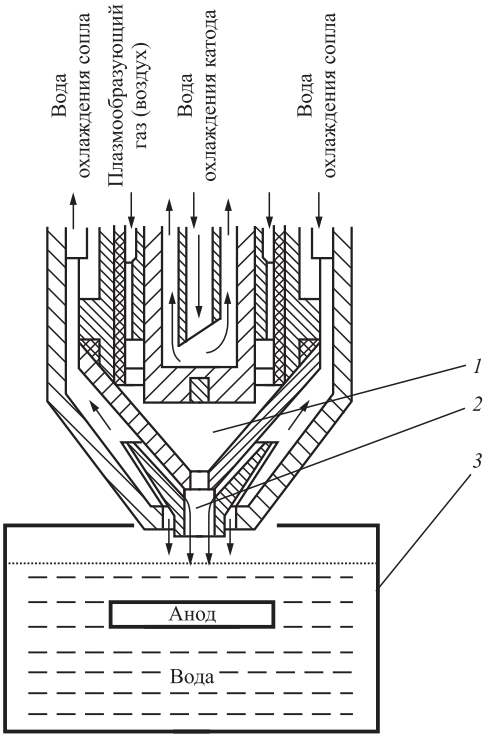


Рис. 1. Схема плазмохимической установки для закалки:
1 — генератор плазмы; *2* — реактор; *3* — закалочное устройство

ность кромок снижается до 1,0...1,2 мм на сторону, что соответствует 2-му классу точности по ГОСТ 14792 [1].

Цель работы — экспериментально определить влияние плазмообразующей среды с добавлением воды на насыщение кромок реза азотом и образование пор при сварке.

Основанием для проведения исследований послужила гипотеза, что под действием высокой температуры в канале сопла происходит термическая диссоциация воды, в результате чего образуется смесь радикалов и валентно-насыщенных частиц, основными из которых являются H_2O; H_2; O_2; H; O; OH.

Синтез соединений в потоке воздушной плазмы представляет значительный интерес, поскольку позволяет получать продукты связанного азота [2] прямой фиксации молекулярного азота. Продуктами связанного азота при добавлении воды в плазму являются нитриты и нитраты металлов NH_3; N_2H_4 и др. (см. кн.: Ганз С.Н., Пархоменко В.Д. Получение связанного азота в плазме. К.: Вища школа, 1976. 190 с.).

В плазмоструйных реакторах, к которым можно отнести сопло плазмотрона, вероятнее всего реализуется квазиравновесие, при этом важной особенностью процесса синтеза является метастабильность продуктов реакции. Для сохранения целевых продуктов обычно применяют закалку, заключающуюся в быстром охлаждении реакционной смеси, например водой. При закалке протекают вторичные реакции, приводящие к изменению состава системы.

Плазмохимическая установка (см. рис. 1) состоит из трех основных частей: генератора плазмы *1*, реактора *2* и закалочного устройства *3*. Системы охлаждения сопла и катода плазмотрона — автономные. Расход воды в этих системах составляет 3...5 и 10 л/мин соответственно.

При подводе электрической энергии температура в генераторе плазмы резко повышается, в канале сопла (реакторе) образуется азот-кислород-водородная плазма, где и происходит химическое взаимодействие азота с водородом и кислородом. Высокотемпературный газовый поток охлаждается до комнатной температуры в закалочном устройстве. Процесс протекает в три стадии:

1) генерация плазмы при высоких температурах;

2) высокотемпературные химические превращения;

3) закалка за счет принудительного охлаждения.

В результате образуются продукты связанного азота.

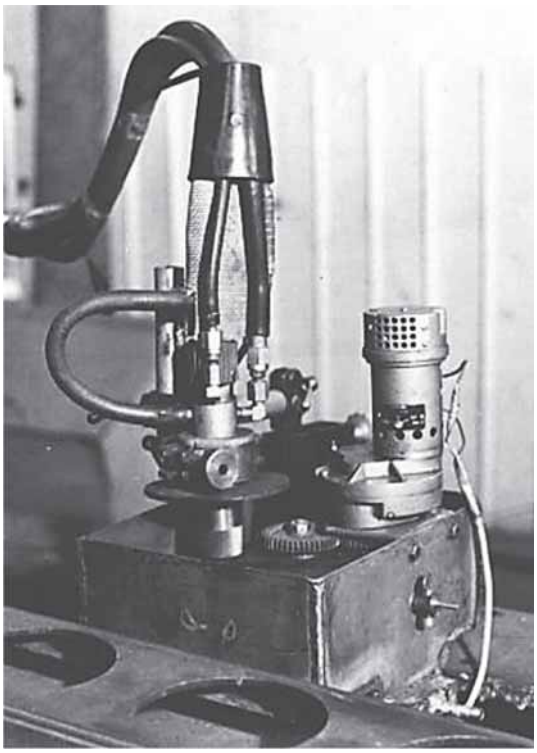
Для экспериментального определения содержания продуктов синтеза и изучения влияния состава плазмообразующей среды на выход продуктов синтеза азота была изготовлена установка (рис. 2), состоящая из плазмотрона ПМР-74М, электродвигателя Д-90 (для вращения подвижного анода) и герметичного корпуса. Подвижный анод выполнен в форме диска диаметром 150 мм из стали 09Г2 толщиной 18 мм или бронзы БрХ07. Закалочная среда — вода объемом 5,6 л, полностью покрывающая подвижный анод.

В качестве плазмообразующей среды использовали чистый воздух и воздух с добавкой воды при расходе воздуха 80 л/мин. Подводимая к плазмотрону мощность — 36 кВт, дугу зажигали между плазмотроном и торцевой поверхностью подвижного анода. Время работы плазмотрона в каждом опыте ограничивали 1 мин. При этом влияния материала анода на выход продуктов реакции не обнаружено.

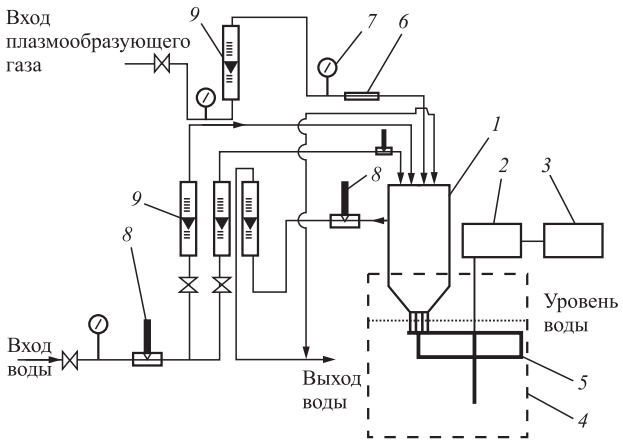
Анализ результатов опытов (табл. 1) показал, что вода закалочной среды после 1 мин работы плазмотрона насыщается химическими соединениями азота и водорода. Выход продуктов реакции при добавлении воды в струю плазмы увеличивается по аммиаку в 2,2 раза, по нитратам — в 2,2 раза, нитритам — в 1,7 раза и гидразину — в 2,4 раза.

Полученные данные подтвердили гипотезу о том, что добавление воды не только способствует образованию водородно-азотистых соединений в плазме, но и позволяет регулировать содержание азота и водорода в плазме, а следовательно, влияет на насыщение кромок реза азотом при резке и образование пор в шве при последующей сварке. При этом следует учитывать взаимное влияние водорода и азота на их растворение в металле и образование пор [3].

Известно, что в присутствии водорода поглощение азота металлом замедляется, а выделение из расплава ускоряется. Поэтому добавка воды в плазму должна оказывать положительное влияние на стойкость металла против пор при сварке, так как уменьшает концентрацию NO в плазме при резке. Если воздушная плаз-



а)



б)

Рис. 2. Общий вид (*а*) и схема (*б*) установки для быстрого охлаждения струи плазмы:

1 — плазмотрон ПМР-74М; *2* — редуктор; *3* — электродвигатель Д-90; *4* — закалочное устройство; *5* — подвижный анод; *6* — осушитель воздуха; *7* — манометр; *8* — термометр; *9* — ротаметр

ма содержит 4,5 % NO, то 0,25 мольных долей водяного пара в плазме снижают концентрацию NO в 2 раза. Исходя из этого можно предположить, что для предотвращения при сварке пор, вызванных азотом, добавки пара в плазме должны составлять 0,1...0,17 мольных долей.

Результаты проведенных экспериментов показали также, что небольшие добавки (до 10 %) водяного пара в плазму повышают напряжение дуги на 20...30 В [1]. При добавке воды в плазму напряжение увеличивается вследствие возрастания степени обжатия дуги. Для оценки влияния этого фактора было определено количество воды, подаваемой в плазму, которое принимает участие в плазмохимических реакциях. Исследования проводили на установке (см. рис. 2) при общем расходе воды в сопло — для наружной водяной завесы и в плазму — 0,1...0,4 л/мин.

Установлено, что в плазмохимических реакциях участвует 9,5...12,6 % воды, подаваемой в струю плазмы. Из общего расхода воды, подаваемой в сопло, в плазму поступает 28...30 %. Так, при общем расходе воды в сопло 0,24 л/мин в плазму попадает 0,07 л/мин, доля водяного пара в смеси в этом случае составляет 12 %.

Для изучения качества металла кромок реза, изменения свойств металла в зоне термического влияния (ЗТВ) осуществляли резку пластин толщиной 7...9 мм из сталей Ст3сп, 09Г2, 10ХСНД в различных плазмообразующих средах на машине "Кристалл ТПл-2,5" с источником питания АПР401 и плазмотроном ПМР-74М при режимах, приведенных в табл. 2. Плазмообразующие среды: сжатый воздух, кислород и их смеси с водой: воздух + вода, кислород + вода. Расход воздуха и кислорода измеряли ротаметром РС-5, расход воды — мерной тарой.

Результаты металлографических исследований, с помощью которых определяли ширину азотированного слоя, ЗТВ и микротвердость кромок реза, служили основным средством

1. Влияние состава плазмообразующей среды на выход продуктов синтеза азота

Плазмообразующая среда	Режим резки		Водородный показатель pH	Выход продуктов реакции, мг/л			
	Ток резки, А	Напряжение дуги, В		NH_3	N_2H_4	Нитраты	Нитриты
Воздух	200	180...200	7,6	2,06	8,1	16,7	42,5
Воздух + вода			7,2	4,46	19,1	37,0	70,1

2. Изменение свойств металла ЗТВ при резке в различных плазмообразующих средах

Плазмообразующая среда	Режим резки			Ширина ЗТВ, мм	Микротвердость, МПа
	Ток резки, А	Напряжение дуги, В	Скорость резки, мм/с		
Воздух	280...300	150...170	33,3	0,7	651
Кислород	250...290	135...140			415
Воздух + вода	260...290	170...180	38,3	0,46	366
Кислород + вода	230...250	160...180		0,57	415

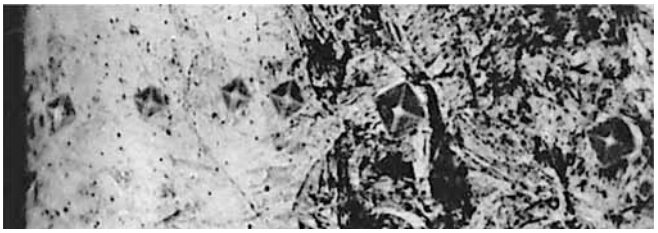


Рис. 3. Отпечатки пирамиды на поперечном шлифе кромки реза при измерении микротвердости. ×500

количественной оценки степени насыщенности кромок азотом. Микротвердость измеряли с помощью прибора ПМТ-3 под нагрузкой 0,2...0,4 Н (рис. 3). Для исследования микроструктуры кромок реза использовали металлографический микроскоп МИМ-9.

Анализ микроструктуры кромок плазменного реза в различных плазмообразующих средах (рис. 4) показал, что нитриды на поверхности кромок отсутствуют. Азот в металле находится в состоянии пересыщенного раствора, для образования которого при плазменной резке создаются оптимальные условия:

1) образуется атомарный азот;

2) за счет газодинамического напора плазменной струи создается повышенное давление в полости реза;

3) вследствие концентрированного ввода тепла и больших скоростей перемещения теплового источника происходит интенсивное охлаждение кромок реза.

Установлено, что при всех исследованных способах резки у самой поверхности кромки наблюдается узкий слой (литой участок ЗТВ) с микротвердостью, превышающей микротвердость металла ЗТВ и основного метала (см. табл. 2).

Количество азота, растворенного в металле кромок реза, находится в прямой зависимости от толщины белого слоя. Связывание азота в соединения, нерастворимые в кромках реза, снижает микротвердость металла.

Максимальная микротвердость 651 МПа получена при резке с использованием в качестве плазмообразующей среды воздуха (см. рис. 4, *а*). На кромках реза наблюдается сплошной белый твердый слой глубиной до 0,03 мм, насыщенный азотом. При резке с добавлением воды к воздуху

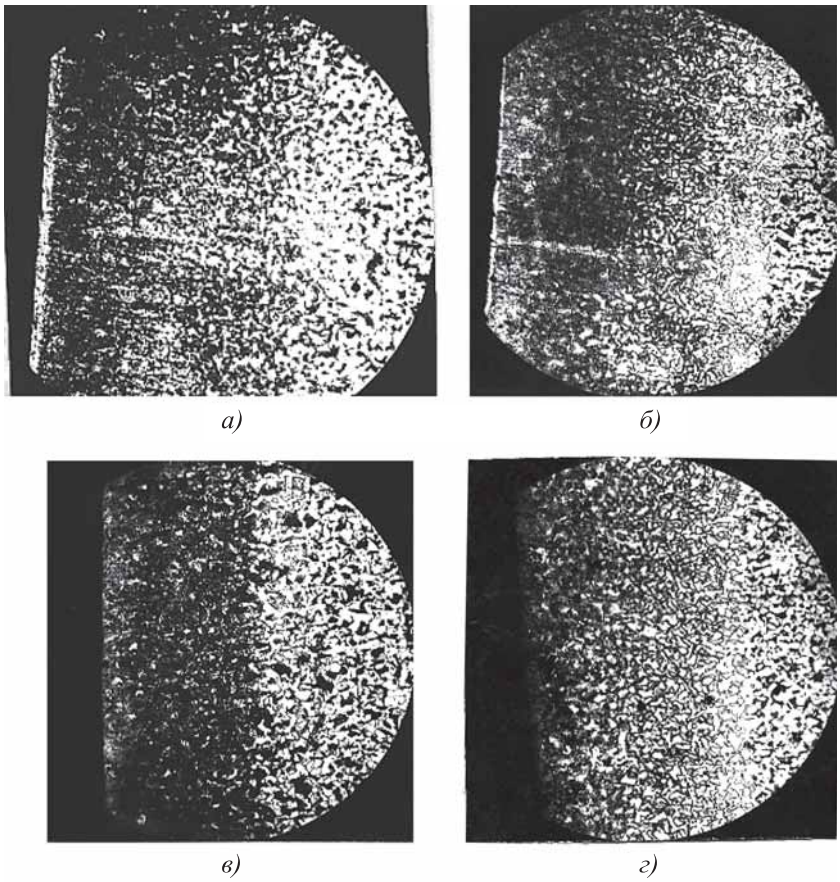


Рис. 4. Микроструктура кромок плазменного реза в различных плазмообразующих средах (×100):

а — воздух; *б* — кислород; *в* — воздух + вода; *г* — кислород + вода

3. Влияние плазмообразующей среды при резке на пористость сварного шва

Плазмообразующая среда	Режим резки			Пористость шва $F_п/F_{пр}$, %
	Ток резки, А	Напряжение дуги, В	Скорость резки, мм/с	
Воздух	280	150	33,3	21,0
Кислород	290	135		2,3
Воздух + вода		180	38,3	2,5
Кислород + вода	250			0,3

(см. рис. 4, *в*) или кислороду (см. рис. 4, *г*) белый слой отсутствует, микротвердость металла кромки снижается до 415...366 МПа.

Сопутствующее охлаждение кромок реза водой уменьшает ширину ЗТВ с 0,7 мм при резке в воздушной плазмообразующей среде до 0,46 мм при резке в плазмообразующей среде воздух + вода (см. табл. 2).

Влияние состава режущей плазмообразующей среды на качество односторонних швов, выполненных по вырезанным кромкам, изучали при сварке пластин длиной 1 м и толщиной 8 мм автоматом АДС-1000 под слоем флюса на постоянном токе обратной полярности.

Пористость швов оценивали визуально по внешнему виду и по излому после разрушения стыка по известной методике [1]. В продольном изломе шва определяли размеры, количество и общую площадь пор $F_п$ и площадь провара $F_{пр}$. Отношение $\frac{F_п}{F_{пр}}$ служило показателем сравнительной оценки качества шва и исследуемого способа резки.

Установлено, что поры в сварных швах, выполненных по кромкам после плазменной резки, располагаются в основном по оси шва. При этом минимальная пористость получена после резки в кислороде с добавлением воды (табл. 3).

Оценка пористости по излому шва показала, что возникающие поры по размерам могут быть охарактеризованы как макропоры, образующиеся в основном при объемном пересыщении газами сварочной ванны, вызванном уменьшением их растворимости при снижении температуры металла.

Выводы

1. Добавление воды в плазму способствует повышению степени обжатия дуги и возрастанию ее энергетических характеристик, что наряду с водородом, образующимся в результате высокотемпературной диссоциации воды, оказывает положительное влияние на производительность и качество резки.

2. При резке конструкционных сталей связывание азота в соединения, нерастворимые в кромках реза, снижает микротвердость кромки реза с 651 МПа при использовании в качестве плазмообразующей среды воздуха до 415...366 МПа при выполнении резки с добавлением воды к воздуху или кислороду. Сопутствующее охлаждение кромок реза водой уменьшает ширину ЗТВ с 0,7 мм при резке в воздушной плазмообразующей среде до 0,46 мм при резке в плазмообразующей среде воздух + вода.

3. Наличие воды в плазме резко снижает газонасыщение кромок реза и уменьшает образование пор в сварных швах. Введение в плазму до 0,25 мольных долей водяного пара достаточно для подавления пор, вызываемых азотом при сварке. Избыточное количество водяного пара может привести к образованию пор, обусловленных воздействием водорода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лебедев В.А., Голобородько Ж.Г., Драган С.В.** Применение плазменной резки с добавлением воды в корпусообрабатывающем производстве // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 5. С. 203—210.

2. **Пархоменко В.Д., Полак Л.С., Сорока П.И.** Процессы и аппараты плазмохимической технологии. К.: Вища школа, 1979. 255 с.

3. **Лихачев В.Л.** Электродуговая сварка. Пособие для сварщиков и специалистов сварочного производства. М.: СОЛОН-Пресс, 2017. 640 с.

Владимир Александрович Лебедев, д-р техн. наук, office@paton.kiev.ua;
Жорж Гаврилович Голобородько, канд. техн. наук;
Станислав Владимирович Драган, канд. техн. наук

УДК 621.98.043:004.942

О.С. Кошелев, Е.В. Чесноков
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Компьютерное моделирование процесса изготовления конических обечаек на двухвалковой листогибочной установке

Рассмотрено распределение напряжений по высоте конической обечайки при получении ее методом свертывания на двухвалковой установке. Показано, что даже при прямой образующей распределение деформации напряжений по высоте носит нелинейный характер. Моделирование процесса деформирования проведено с использованием программного комплекса DEFORM.

Ключевые слова: коническая обечайка; компьютерное моделирование; деформации; напряжение в материале.

The distribution of stresses along the height of the conical shell when obtaining it by the method of rolling on two-roll machine is considered. It is shown that, even with direct generatrix, the stress strain distribution along the height is non-linear. Modeling of the deformation process is carried out using the software complex DEFORM.

Keywords: conical shell; computer modeling; deformations; stress in material.

Конические обечайки нашли широкое применение во многих отраслях машиностроительных производств. Наибольшее распространение эти изделия получили при изготовлении летательных аппаратов и в химическом производстве, где наиболее часто используют обечайки из алюминиевых и титановых сплавов.

Конические обечайки изготовляют различными способами: обработкой резанием, ротационной вытяжкой, гибкой на трех- и четырехвалковых установках, комбинированными методами. Известные методы получения конических обечаек характеризуются высокой энерго- и материалоемкостью, применением дорогостоящего оборудования [1].

Методы изготовления конических обечаек с использованием процессов обработки металлов давлением (ОМД) по сравнению с другими методами имеют следующие преимущества: увеличение коэффициента использования материала, относительно простые по конструкции машины-орудия, получение высокого качества изделия за счет упрочнения его поверхностных слоев. Поэтому разработка технологии и установок для процессов ОМД остается актуальной задачей.

В развитие указанных методов на кафедре "Машиностроительные технологические комплексы" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева был разработан ряд листогибочных установок [2—4], принцип действия которых основан на использовании метода свертывания листового материала. Применение этого способа для получения конических обечаек характеризуется простотой технологии, низкой энергоемкостью, высоким коэффициентом использования материала, а также возможностью получать не только усеченные конические обечайки, но и обечайки другой формы.

В последние годы для анализа процессов ОМД и технологической подготовки производства используют компьютерные программы, основанные на методе конечных элементов, такие как QFORM, DEFORM и др. DEFORM позволяет прогнозировать характер формообразования при операциях ОМД без существенных затрат на экспериментальное исследование [5].

DEFORM использовали для исследования некоторых параметров изготовления деталей (рис. 1) по методу свертывания листового материала.

Моделирование процесса получения деталей проводили для следующих условий: скорость вращения деформирующих валков 1 об/мин; температура заготовки и валков 20 °С; заготовка из алюминиевого сплава АМц толщиной 2 мм; высота формообразующего валка 150 мм; угол при вершине 30°. Процесс разбит на 70 шагов.

На рис. 2, *а* (см. обложку) приведено распределение деформаций в обечайке на разных стадиях процесса (верхний прижимной валок для наглядности скрыт).

Рассмотрим подробнее распределение интенсивности напряжений по высоте заготовки (рис. 2, *б*, см. обложку).

В начальный момент формообразования (10-й шаг процесса расчета) наблюдается относительно равномерное распределение напряжений по всей длине очага деформации, с незначительным увеличением интенсивности в верхней половине изделия (до 140...150 МПа).

В середине процесса формообразования (36-й шаг) происходят уменьшение равномерности и концентрация напряжений в верхней части изделия.

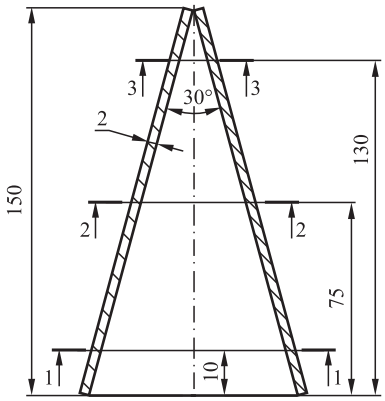


Рис. 1. Схема обечайки, полученной методом свертывания: 1, 2, 3 — номер сечения

В конце процесса формообразования (58-й шаг) напряжения достигают максимальных значений в вершине обечайки (до 170 МПа).

Результаты, приведенные на рис. 2, показали, что деформации и напряжения максимальны в носовой части обечайки. Это объясняется тем, что в верхней части обечайки радиус гибки значительно меньше, чем у основания.

Далее рассмотрим картину распределения деформаций на наружной поверхности обечайки. Для этого по результатам компьютерного моделирования на 36-м шаге процесса построим график зависимости интенсивности деформации ε от высоты обечайки *h* (рис. 3).

Из рис. 3 следует, что распределение интенсивности деформации имеет нелинейный характер. У основания изделия небольшие значения ε (в пределах 0,03), в средней части — значения монотонно возрастают, а затем у вершины изделия интенсивно увеличиваются, достигая ε = 0,28...0,3 (красная зона на рис. 2, *б*).

Исследовали также распределение интенсивности деформаций по толщине заготовки, от которого зависит возможность образования в готовой детали трещины, расслоения и др. В этом случае рассматривали распределение интенсивности деформации в трех сечениях изделия, отстоящих от основания на высоте 10, 75 и 130 мм (см. рис. 1).

Интенсивность деформации в процессе формообразования определяли в каждом из сечений в трех равноотстоящих друг от друга по толщине заготовки точках: т. 1 — на внутренней поверхности обечайки; т. 2 — в середине; т. 3 — на наружной поверхности. Результаты измерений представлены на рис. 4.

Анализ результатов, представленных на рис. 4, показал, что по мере уменьшения радиуса гиба максимальная деформация сме-

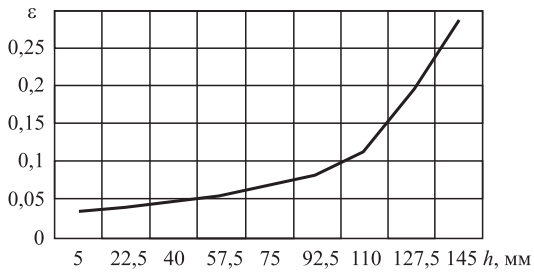


Рис. 3. Распределение интенсивности деформации по высоте обечайки

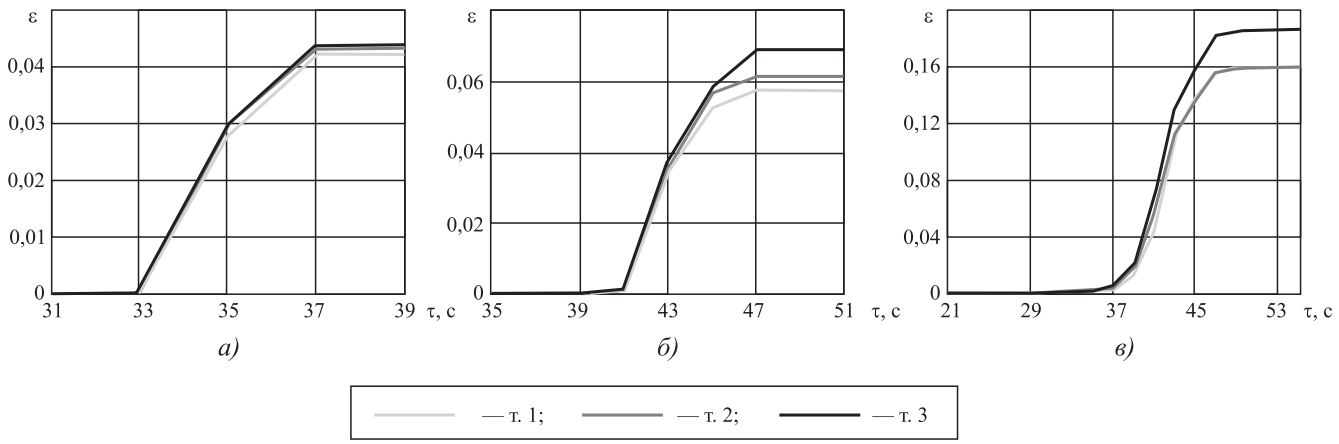


Рис. 4. Распределение интенсивности деформации по толщине заготовки:
а — 10 мм; *б* — 75 мм; *в* — 130 мм

щается на наружную поверхность обечайки. Если у основания обечайки разница значений интенсивности деформации между точками 1 и 2 (0,0025) и точками 2 и 3 (0,0039) относительно невелика, то у вершины они существенно разнятся (0,0035 и 0,064). Это позволяет заключить, что наружная поверхность в верхней части изделия подвергается максимальным деформациям. Также из рис. 4 можно установить, что наиболее равномерное распределение интенсивности деформации по толщине изделия наблюдается у основания обечайки.

Более наглядно изменения интенсивности деформации на внутренней, средней и наружной поверхностях заготовки в различных сечениях обечайки показаны на рис. 5.

Из рис. 6 следует, что от внутренней к наружной поверхности обечайки и с уменьшением радиуса гиба наблюдается существенное приращение значения интенсивности деформации, что объясняет ее максимальную концентрацию в вершине изделия на рис. 2, *а*.

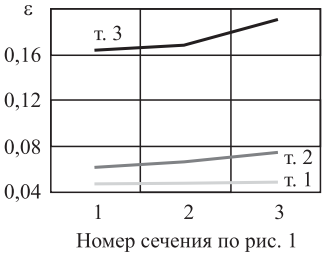


Рис. 5. Распределение интенсивности деформации в различных точках по толщине листа на разной высоте обечайки

Заключение. В результате моделирования процесса свертывания листовой заготовки толщиной 2 мм из сплава АМц получены следующие результаты:

1. Распределение деформаций по высоте изделия, даже при изготовлении конических обечаек с прямой образующей носит нелинейный характер.

2. Деформации максимальны на вершине конической части обечайки.

3. Распределение деформаций по толщине материала при получении конических обечаек с прямой образующей носит нелинейный характер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кошелев О.С., Иванов С.В., Чесноков Е.В.** Анализ применяемых методов изготовления обечаек // Труды Нижегородского техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5 (107). С. 243—246.

2. **Листогибочная** установка: пат. на полезную модель № 80366 / О.С. Кошелев, В.В. Галкин, Ю.С. Просвирнин, Г.А. Истюков, О.Г. Ушаков. Зарегистрировано 10.02.2009.

3. **Листогибочная** установка: пат. на полезную модель № 80367 / О.С. Кошелев, В.В. Галкин, Ю.С. Просвирнин, Г.А. Истюков, О.Г. Ушаков. Зарегистрировано 10.02.2009.

4. **Листогибочная** установка: пат. на полезную модель № 155754 / О.С. Кошелев, С.В. Иванов, Е.В. Чесноков. Зарегистрировано 24.09.2015.

5. **Практическое** руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учеб. пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 266 с.

Олег Сергеевич Кошелев, д-р техн. наук,
kos7shef3@yandex.ru;
Егор Владимирович Чесноков

УДК 669.14:539.375:621.7.019

В.В. Галкин, А.В. Братухин*, Г.Н. Гаврилов, С.В. Иванов
*(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, *ПАО "Нормаль", г. Нижний Новгород)*

К вопросу низкой стойкости пуансонов при выдавливании крестообразного шлица в винтах с потайной головкой из стали 14Х17Н2

Исследованы причины низкой стойкости пуансонов при выдавливании крестообразного шлица в винтах с потайной головкой из стали мартенсито-ферритного класса 14Х17Н2 на основании оценки величины и распределения напряжений на поверхности контакта пуансона с материалом. На примере высадки винта М5 с уменьшенной потайной головкой и крестообразным шлицем проведено математическое моделирование для определения напряженно-деформированного состояния материала в объеме высаживаемой части заготовки и экспериментальная оценка его упрочнения по методу твердости. Получены данные о строении очага деформации в условиях выдавливания крестообразного шлица, состоящего из зоны активной деформации, расположенной по контактной поверхности и имеющей малую толщину, и промежуточной зоны, занимающей остальную часть головки винта. Отличие активной зоны от остального объема заключается в наличии в ней кроме нормальных напряжений на контактной поверхности, напряжений, обусловленных контактными силами трения, величина которых уменьшается по мере перехода к промежуточной зоне. Рассчитанные значения последних превышают значения нормальных напряжений на контактной поверхности, что обусловливает и объясняет низкую стойкость пуансона в результате изменения его геометрии за счет истирания.

Ключевые слова: стойкость пуансонов; выдавливание крестообразного шлица в винтах; контактная поверхность пуансона с материалом; строение очага деформации; нормальные напряжения на контактной поверхности; контактные силы трения.

The causes of low durability of punches at extrusion of Philips slot in countersunk screws from 14Kh17N2 martensite-ferrite class steel are analyzed based on the value and distribution of stresses on the punch—material contact surface. On the example of upsetting of M5 small raised countersunk and Philips slot screw. Mathematical modeling to determine of stress-strain state of the material in the volume of the upset part of the work piece and experimental estimate of material hardening by the hardness test are performed. Data on the deformation zone structure at Philips slot extrusion, consisting of small thickness active deformation zone located over the contact surface, and of intermediate zone in the remainder of the screw head are obtained. The difference between the active zone and the rest of the deformation volume consists in the fact that, apart from strains normal to the contact surface, the former has also strains caused by contact friction forces which decreases in the transition to intermediate zone. The estimated values of latter exceed the values of strains normal to the contact surface, thus explaining and being responsible for the low durability of the punch by changing its structural geometry caused by abrasion.

Keywords: durability of punches; extrusion of cross recesses of screws; contact surface between punch and material; deformation zone structure; strains normal to contact surface; contact friction forces.

В машиностроении широко применяют винты с крестообразным шлицем из высокопрочных материалов, в частности сталей мартенсито-ферритного класса. Проблемы их производства заключаются в низкой стойкости формообразующего профиля пуансонов (далее — пуансон) в результате изменения его геометрии при осевом выдавливании крестообразного шлица (далее — шлиц).

Процесс холодной высадки винтов (рис. 1) включает в себя от двух до четырех операций. На первых операциях выполняются редуцирование стержневой части заготовки под накатку резьбы и предварительная осадка

а) *б)*

Рис. 1. Винт М5 с уменьшенной потайной головкой и крестообразным шлицем по ГОСТ 10753—86 (*а*) и операционные заготовки высадки (*б*)

высаживаемой части. Шлиц формуется на последней операции осевым вдавливанием пуансона в плоский торец заготовки с одновременным оформлением внешнего контура головки винта.

Для определения причин низкой стойкости пуансона необходима оценка величины и распределения напряжений на поверхности контакта инструмента с материалом заготовки (далее — контактная поверхность).

В теории обработки металлов давлением рассматриваемая операция получения шлица определена как внедрение пуансона в пластическое полупространство (рис. 2) [1]. При этом сделаны упрощения, согласно которым не учтено контактное трение, а изменяющееся нормальное напряжение на контактной поверхности вследствие деформационного упрочнения материала заменено средней величиной.

Для определения величины и распределения напряжений на контактной поверхности используют следующие методы: линий скольжений, верхней оценки, сопротивления материалов пластическому деформированию. Для пуансонов с различной формой торца разработаны инженерные решения по определению нормальных напряжений $\sigma_н$ на контактной поверхности.

В частности, для цилиндрического пуансона при отсутствии трения (рис. 3) они определяются выражением А.Д. Томленова [1]

$$\sigma_н = \sigma_s\left(1 + \frac{\pi}{2} - \gamma\right), \qquad (1)$$

где σ_s — напряжение текучести; γ — угол, определяющий положение исследуемого участка.

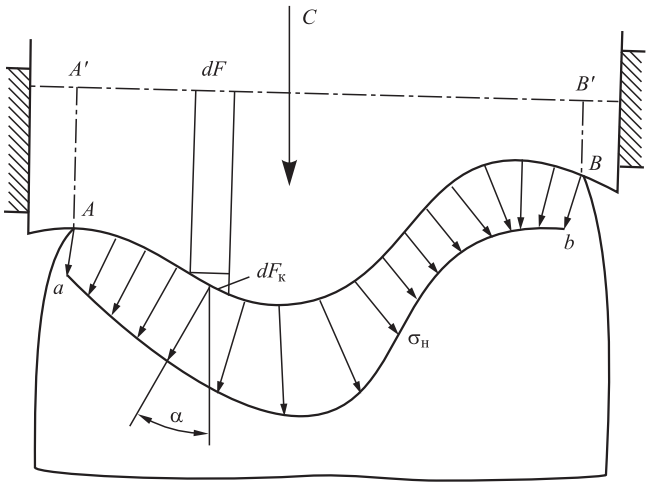


Рис. 2. Схема распределения нормальных напряжений на поверхности контакта инструмента с заготовкой [1]

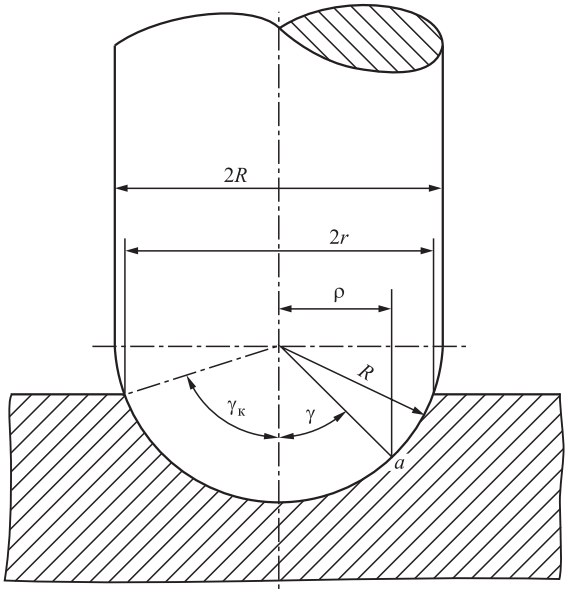


Рис. 3. Схема к определению нормальных напряжений при внедрении в пластическую среду цилиндрического пуансона [1]

Условия рассматриваемой операции выдавливания по сравнению с ранее исследуемыми операциями [2] имеют отличия: выдавливание шлица осевым движением пуансона совмещено с получением конической (потайной) формы головки путем радиальной раздачи материала цилиндрической заготовки, боковая поверхность которой является свободной, а диаметр соизмерим с поперечным размером пуансона.

Для учета сил трения по контактной поверхности в условиях данного исследования использован метод математического моделирования с применением специализированного программного продукта, основанного на методе конечных элементов. Он определяет напряженно-деформированное состояние материала в условиях объемного деформирования в показателях интенсивности напряжений σ_i и деформаций ε_i.

Кроме математической оценки возможна косвенная экспериментальная оценка упрочнения материала в объеме головки винта со шлицем по методу твердости. Метод вдавливания индентора (метод твердости) основан на функциональной зависимости между твердостью и интенсивностью напряженного состояния. Для элементарного объема изделия интенсивность напряжений характеризует работу пластической деформации и, как следствие, изменение прочностных характеристик материала.

Зависимость интенсивность напряжений—твердость является аналитической, не зависит от схемы напряженного состояния и определяется полиномом третьей степени. Эту зависимость можно определить эмпирическим выражением В. Беклемищева [3] на основании показателей механических свойств металла, полученных при линейном растяжении

$$\sigma_i = \sigma_т + \left[0,9\frac{\sigma_т}{\sigma_у}\left(H + H_у\right) \pm 1\right]^3, \qquad (2)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести; $\sigma_у$ — напряжение при предельно устойчивой деформации; H — твердость деформированного материала; $H_у$ — твердость при предельно устойчивой деформации.

Комплексная методика с применением методов математического моделирования и твердости позволяет по сравнению с ранее используемыми методами более объективно дать оценку величины и распределения напряжений на контактной поверхности в условиях осевого выдавливания крестообразного шлица с учетом сил трения, что и стало целью работы. Для ее достижения необходимо решение следующих задач:

- исследование формирования очага деформации и его строения в цилиндрической заготовке со свободной боковой поверхностью в процессе осевого вдавливания в ее торец пуансона, имеющего шлицевой профиль, размеры которого сопоставимы с диаметром заготовки;
- определение изменения прочностных свойств материала в объеме высаживаемой части заготовки на основании метода твердости.

В качестве объекта исследования выбран винт М5 (далее — винт) с уменьшенной потайной головкой и крестообразным шлицем из стали мартенсито-ферритного класса 14Х17Н2, изготовляемый за четыре операции (рис. 4). Химический состав и механические свойства стали 14Х17Н2 приведены в табл. 1 и 2.

В соответствии с поставленными задачами определены этапы работы:

— определение напряженно-деформированного состояния в объеме головки винта на переходах высадки методом математического моделирования;

— испытание исходного материала (проволоки) на одноосное растяжение, определение механических характеристик: предела текучести $\sigma_т$, напряжения при предельно устойчивой деформации $\sigma_у$ и построение кривой упрочнения;

— замеры твердости деформированного материала H и при предельно устойчивой деформации $H_у$;

— высадка операционных заготовок и изготовление из них продольных шлифов;

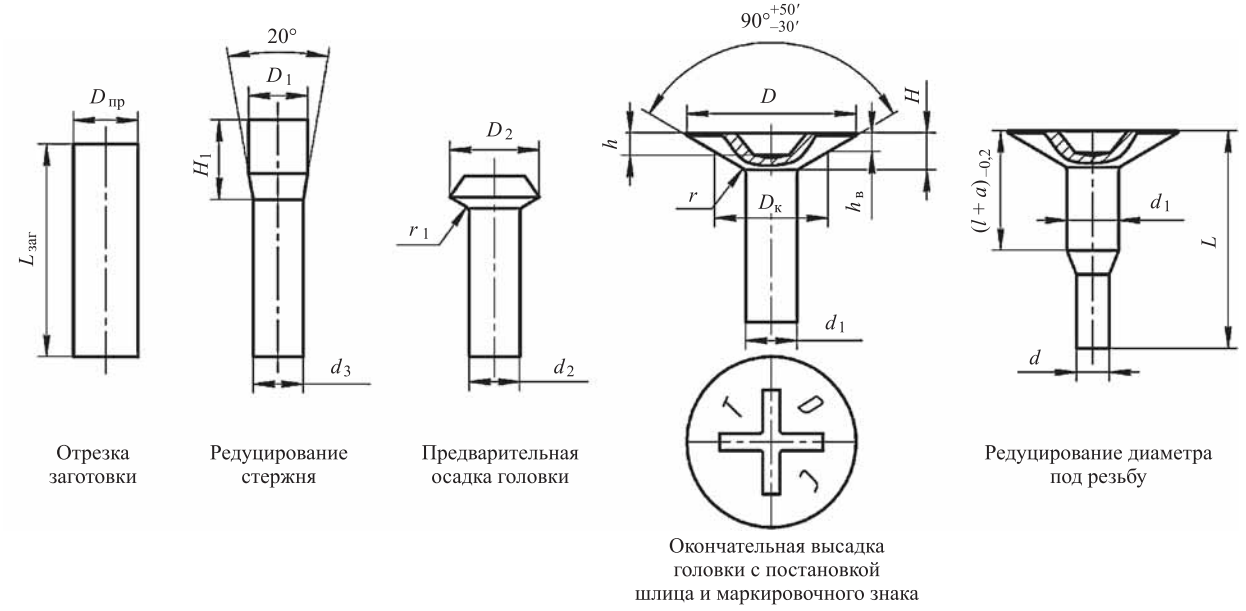


Рис. 4. Переходы высадки винта М5 с уменьшенной потайной головкой и крестообразным шлицем

1. Химический состав стали 14Х17Н2 по ГОСТ 5632—2014

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
0,11...0,17	До 0,8	До 0,8	1,5...2,5	До 0,025	До 0,03	16...18	До 0,2	До 0,3

2. Механические свойства стали 14Х17Н2 по ГОСТ 5949—75

$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ_5	ψ	*KC*U, кДж/м^2
МПа		%		
835	635	16	55	750

— измерение микротвердости HV металла в области головки на шлифах операционных заготовок для оценки деформационного упрочнения по методу твердости.

По результатам механических испытаний получены прочностные характеристики стали: $\sigma_т$ = 495 МПа; $\sigma_у$ = 890 МПа; Н = 120; $Н_у$ = 240.

Математическое моделирование проводили с использованием программного комплекса DEFORM-3D. Упрощенные твердотельные модели исходной заготовки и инструмента на переходах высадки были разработаны в программе PRO ENGINEER. При оценке напряженно-деформированного состояния стали 14Х17Н2 использовали кривую упрочнения в обобщенных координатах интенсивность напряжений—степень деформации (рис. 5, *б*), состоящую из участка в виде экспоненты, построенного на основании испытания на растяжение [3] проволоки, используемой для высадки винта М5 (рис. 5, *а*), с переходом в прямолинейную зависимость [4].

Микротвердость HV измеряли с использованием микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой 0,981 Н и увеличением ×300 (для отпечатков 76...125 мкм). Замеры осуществляли на продольных шлифах операционных заготовок при предварительной и окончательной высадке головки.

Результаты математического моделирования представлены в виде картин напряженно-деформированного состояния (рис. 6 и 7, см. обложку) на двух стадиях. На первой стадии происходит внедрение в заготовку торцевого конического участка пуансона; на второй — сопряженного участка усеченного конуса.

При вдавливании в заготовку конического участка пуансона деформированное состояние материала объема заготовки характеризуется неоднородностью. В слоях заготовки, определяемых расстоянием от поверхности пуансона 0,02...0,06 его поперечного размера (0,1 мм), реализуются деформации ε_i = 0,982 и выше. При удалении в радиальном направлении пластическая деформация снижается до ε_i = 0,655 на расстоянии 0,1...0,2 поперечного размера пуансона (0,3 мм) и далее до ε_i = 0,329 на расстоянии 1,4 мм.

Картина напряженного состояния, как и деформированного состояния, имеет пространственную неоднородность с аналогичными по конфигурации зонами. В слоях металла, примыкающих к поверхности пуансона, интенсивность напряжений составляет σ_i = 1544 МПа. Далее в радиальном направлении во второй зоне интенсивность напряжений снижается до 1230 МПа.

При вдавливании в заготовку усеченного конуса деформированное состояние материала в объеме заготовки повышается. По контактной поверхности деформация достигает значения ε_i = 2,64. Она реализуется в слое толщиной

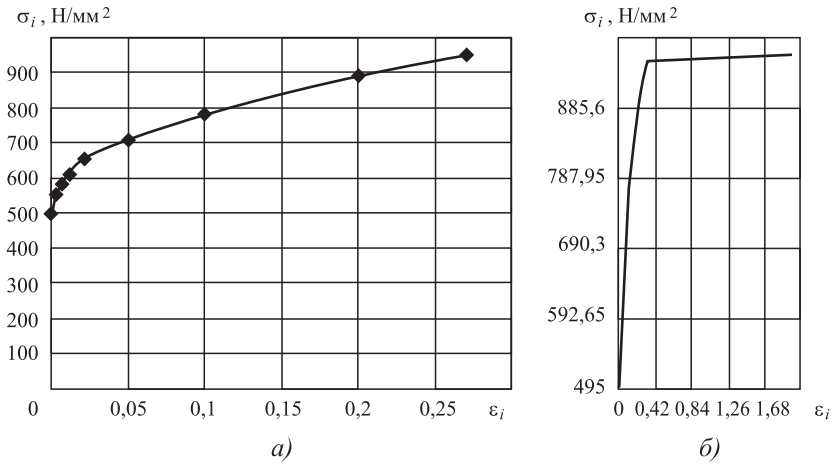


Рис. 5. Кривая упрочнения стали 14Х17Н2:
а — при растяжении; *б* — в обобщенных координатах интенсивность напряжений—степень деформации

0,02...0,05 максимального поперечного размера пуансона (0,1 мм), в котором напряжения равны 3730 МПа.

Далее располагается слой толщиной 0,06...0,08 максимального поперечного размера пуансона (0,2...0,5 мм), в котором деформация ε_i = 1,32. Напряженное состояние в данной зоне составляет 2500 МПа.

В остальной части головки деформация достигает значений ε_i = 1,32, которой соответствует напряжение 1270 МПа. В промежуточных зонах между пазами интенсивность напряженно-деформированного состояния значительно снижается.

Математическое моделирование позволяет дать оценку строения очага деформации. Очаг имеет сложную конфигурацию, в котором отсутствует зона затрудненной деформации и можно выделить две зоны, отличающиеся напряженно-деформированным состоянием материала.

Зона активной деформации располагается эквидистантно контактной поверхности пуансона с заготовкой и имеет малую толщину, равную 0,02...0,06 поперечного размера пуансона. Максимальная деформация ε_i = 2,64 соответствует контактной поверхности и реализуется при напряжениях ~1600 МПа.

Основной объем высаженной головки находится в зоне промежуточной деформации ε_i = 1,32 при напряжениях 1279 МПа. Различие напряженного состояния в объеме деформируемой заготовки определяется кроме изменяющихся нормальных напряжений на контактной поверхности возникновением напряжений от сил

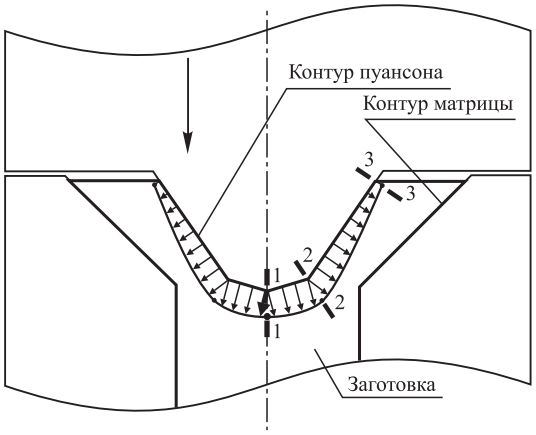


Рис. 8. Эпюра нормальных напряжений на контактной поверхности пуансона с заготовкой

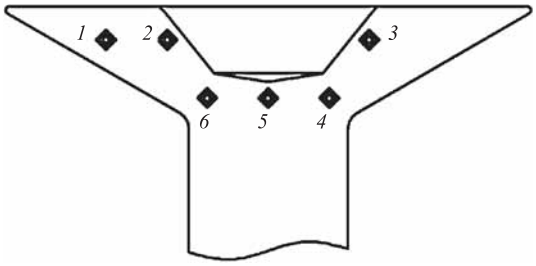


Рис. 9. Микротвердость в продольном сечении головки винта М5:

1 — 257 HV; *2* — 263 HV; *3* — 260 HV; *4* — 268 HV; *5* — 270 HV; *6* — 267 HV

трения. Их соотношение изменяется по контактной поверхности пуансона с заготовкой (рис. 8).

По коническому участку пуансона, начиная от сечения 1—1 до сечения 2—2, преобладают нормальные напряжения 1100...1270 МПа. На участке усеченного конуса по мере перехода от сечения 2—2 к сечению 3—3 (см. рис. 8) нормальные напряжения уменьшаются до 200...300 МПа, а интенсивность напряжений в основном определяется касательными напряжениями.

Замеры микротвердости HV на продольном шлифе головки винта приведены на рис. 9. На их основании с использованием прочностных характеристик исходного материала по выражению В. Беклемищева (2) рассчитана интенсивность напряжений. Ее значения находятся в интервале 880...900 МПа, что согласуется с данными математического моделирования. В силу малой толщины приконтактной зоны максимальной деформации замеры микротвердости в ней не проводили.

Экспериментальное доказательство неоднородности деформированного состояния материала возможно с применением микроструктурного анализа. Это было подтверждено микроструктурами материала внутренних полостей, выдавленных пуансонами различной формы, приведенными в работе В.Г. Кутяйкина [2]. Причины возникновения значительной неоднородности определены не были.

Выводы

1. Проведено комплексное исследование строения очага деформации в условиях выдавливания шлицевого паза в торце цилиндрической заготовки с применением методов

математического моделирования и твердости. По его результатам приведены сведения об отсутствии зоны затрудненной деформации и наличии двух характерных зон активной и промежуточной деформации. Зона активной деформации располагается эквидистантно контактной поверхности пуансона с заготовкой и имеет малую толщину, равную 0,02...0,06 поперечного размера пуансона. Максимальная деформация ε_i = 2,64 соответствует контактной поверхности и реализуется при напряжениях ~1600 МПа, значительно превышающих напряжения кривой упрочнения. Основной объем высаженной головки находится в зоне промежуточной деформации ε_i = 1,32 при напряжениях 1279 МПа. Данное соотношение подтверждено экспериментальными данными замеров твердости, через которые по аналитической зависимости пересчитаны значения интенсивности напряжений.

2. Наличие первой зоны по поверхности контакта деформируемой нержавеющей стали с пуансоном, значительно отличающейся напряженно-деформированным состоянием от остального объема, объясняется присутствием в ней кроме нормальных напряжений на контактной поверхности напряжений, обусловленных контактными силами трения, величина которых уменьшается по мере перехода ко второй зоне.

3. Рассчитанные значения напряжений от контактных сил трения превышают значения нормальных напряжений на контактной поверхности, что обусловливает и объясняет низкую стойкость пуансона в результате изменения его геометрии за счет истирания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Сопротивление материалов. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
2. **Кутяйкин В.Г.** Метрологические и структурно-физические аспекты деформирования сталей. М.: АСМС, 2007. 484 с.
3. **Смирнов-Аляев Г.А.** Сопротивление металлов пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1978. 386 с.
4. **Кроха В.А.** Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник. М.: Машиностроение, 1980. 157 с.

Владимир Викторович Галкин, канд. техн. наук;
Анатолий Владиславович Братухин;
Геннадий Николаевич Гаврилов, д-р техн. наук;
Сергей Владимирович Иванов,
omd@nntu.ru

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 620.178.156.6.

Р.Е. Глинер, Е.Б. Катюхин
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева),
В.А. Пряничников *(ООО "ВолгоСтальПроект", г. Нижний Новгород)*

К определению энергетических характеристик сопротивления металла деформациям

Рассмотрены инновационные подходы в оценках качества деформируемого металла, предусматривающих определение работы деформирования, выявляемой в испытаниях на растяжение. Представлен пример практической реализации данных подходов в виде распорядительного документа (методической инструкции). Инструкция является дополнением к общепринятому стандарту испытания на растяжение и устанавливает порядок проведения и обработки результатов испытаний с определением энергетических характеристик деформируемости металла, которые предполагается использовать при контроле его качества, проявляющегося в различных способах механической обработки и видах механического воздействия при эксплуатации.

Ключевые слова: деформация; сопротивление деформации; испытание на растяжение; работа деформации; критерии сопротивления деформации.

Innovative approaches are considered in assessing the quality of deformable metal, providing for the definition of the work of deformation, which is revealed in tensile tests. Example of the practical implementation of these approaches is presented in the form of administrative document (methodical instruction). The instruction is in addition to the standard tensile test standard and establishes the procedure for carrying out and processing the test results with the determination of the energy characteristics of the metal deformability, which are intended to be used to control its quality, which manifests itself in various machining methods and types of mechanical impact during operation.

Keywords: deformation; strain resistance; tension test; work of deformation; strain resistance criteria.

Наряду со стандартными характеристиками прочности и пластичности ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, δ, ψ), в практике механических испытаний на растяжение используют энергетическую характеристику — работу удлинения, определяемую по площади, заключенной между кривой растяжения и осью удлинения.

Увеличение прочности ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$) при сохранении пластичности (δ, ψ), так же как и повышение пластичности при сохранении прочности, вызывает увеличение работы деформации. При этом, как правило, увеличение прочности сопровождается уменьшением пластичности, поэтому работа удлинения, отражая в совокупности проявление прочности и предельной пластичности, представляется [1] более чувствительной характеристикой проявления структурного состояния материала, чем образующие ее стандартные свойства. Из этого следует, что работу удлинения, наряду с общепринятыми характеристиками прочности и пластичности, целесообразно учитывать как значимую характеристику при оценке сопротивления технологической и эксплуатационной деформации.

Однако работа удлинения не входит в ряд стандартизованных характеристик механических свойств и в нормативную документацию по управлению качеством металла, что связано с недостаточной методической законченностью определения ее в стандартизуемых лабораторных испытаниях.

В статье рассмотрены подходы к решению этой задачи, основанные на следующих представлениях.

Фактически площадь под кривой растяжения (рис. 1) характеризует работу упругого удлинения (площадь треугольника) и работу

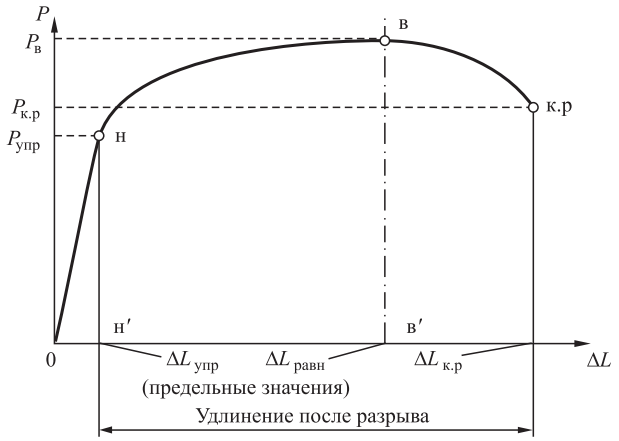


Рис. 1. Первичная кривая растяжения (зависимость между удлинением ΔL и нагрузкой P) с обозначением точек, характеризующих отдельные этапы удлинения:

т. н — начало пластического удлинения; т. в — предельное равномерное удлинение; т. к.р — конечное удлинение (при разрыве)

пластического удлинения (площадь фигуры, ограниченная всем параболическим участком кривой). При этом прогнозируемые условия механического воздействия на металл (технологического и эксплуатационного) не предполагают макроскопическую локализацию деформации, инициирующую разрушение. Поэтому в оценках сопротивления технологической и эксплуатационной деформации наибольший практический интерес представляет работа упругой деформации $A_{упр}$, характеризуемая площадью 0н′н, и работа равномерной деформации $A_{равн}$, характеризуемая площадью н′нвв′.

При отношении работы $A_{упр}$ и $A_{равн}$ к деформируемому объему испытуемого образца $V_0 = lF_0$ (где l — исходная расчетная длина; F_0 — исходная площадь поперечного сечения испытуемого образца) получаем удельную работу упругого удлинения $a_{упр}$ и удельную работу пластического удлинения $a_{равн}$.

Так же как и характеризующие прочность напряжения, определяемые при испытании на растяжение, удельная работа удлинения является характеристикой механических свойств, не зависящей от размеров образца, что делает ее универсальной характеристикой механических свойств, позволяющей сопоставлять различные металлы, ранжируя их по способности к технологической и эксплуатационной деформации. При этом удельная работа $a_{упр}$ отражает деформируемость в виде предельных для данного металла работ на стадии упругого удлинения, а величина $a_{равн}$ — деформируемость в виде предельных для данного металла работ необратимых формоизменений на стадии равномерного удлинения.

Характерно [1], что удельные работы удлинения определяются как площади под кривыми истинных напряжений в координатах "истинные удлинения ε (истинные сужения φ[1]) — истинные напряжения S" (рис. 2), получаемых перестройкой первичных кривых растяжения.

При этом определяются удельные работы: упругого удлинения $a_{упр}$ (площадь треугольника 0нн′), равномерного пластического удлинения $a_{равн}$ (площадь, ограниченная криволинейной трапецией нн′вв′) и сосредоточенного пластического удлинения $a_{соср}$ (площадь, ограниченная криволинейной трапецией вв′к.р′к.р).

[1] При равномерном пластическом удлинении ε = φ.

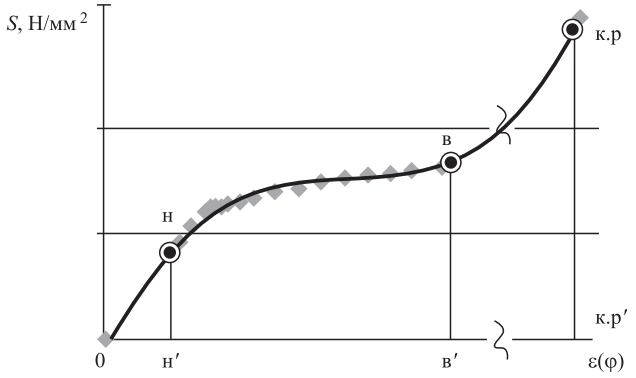


Рис. 2. Кривая истинных напряжений и удлинений при растяжении с обозначением отдельных этапов удлинения:
0н — упругое удлинение; нв — равномерное пластическое удлинение; вк.р — сосредоточенное удлинение

Другим отражением восприимчивости металла к деформации является сопротивление деформации при возрастании удельной механической работы, определяемой отношением приращения удельной работы к соответствующему приращению истинного (логарифмического) удлинения ε или сужения φ, принимаемым за 100 %.

Таким образом, приходим к энергетическим критериям податливости k — удельным работам, требуемым для увеличения упругого и пластического удлинения ε на 1 %, соответственно $k_{упр}$ и $k_{равн}$. При этом $k_{упр}$ характеризует *упругую энергетическую* податливость[2], $k_{равн}$ — пластическую энергетическую податливость[3].

Определяемый таким образом критерий податливости при равномерной пластической деформации $k_{равн}$ так же, как удельная работа, является значимым показателем при прогнозировании поведения металла в технологической обработке и эксплуатации. При этом удельная работа $a_{равн}$ характеризует предельную для данного металла работу до проявления деформационной локализации. Увеличение ее численного значения означает улучшение технологичности металла при обработке давлением и способность воспринимать большее механическое воздей-

[2] В работе [2] упругая деформация материала характеризуется величиной, называемой податливостью, обратной модулю упругости при растяжении, и таким образом, модуль упругости проявляет себя как критерий упругой податливости, но не энергетической (как $k_{упр}$), а силовой.

[3] Термин "пластическая податливость" применен в работе Г.А. Смирнова-Аляева "Сопротивление материалов металлическому деформированию" (Л.: Машиностроение, 1978. 320 с.) при рассмотрении пластической деформируемости.

ствие без проявления локализации деформации в эксплуатации. Критерий k характеризует темп накопления деформации. Повышение его численного значения означает большее сопротивление механическому воздействию в эксплуатации, однако при этом ухудшается технологичность металла при механической обработке.

Номинально единица критерия податливости k — Н/мм^2 (что соответствует Дж/мм^3). Фактически это означает, что величина k характеризует также и темп возрастания напряжений при увеличении работы механического воздействия.

Удлинение, выявляемое при равномерном одноосном растяжении, совпадает с более общим показателем деформированного состояния — интенсивностью деформации. Независимо от способа технологического и эксплуатационного деформирования интенсивность имеет одно и то же значение, если на деформацию затрачивается одинаковая механическая работа. Это позволяет использовать величины $a_{равн}$ и $k_{равн}$, определяемые при испытании на растяжение, в оценке деформируемости при различных способах обработки металла давлением и видах механического воздействия при его эксплуатации.

При испытании цилиндрических образцов могут быть определены величины $a_{соср}$ и $k_{соср}$, характеризующие предельную (в момент разрушения) удельную работу, и податливость в локализованном удлинении, проявляющиеся при нарушении проектируемых условий технологического или эксплуатационного механического воздействия на металл. При этом принято [3], что $a_{соср} = 0{,}5(S_{к.р} + S_в)$, где $\Delta\varphi = \varphi_{к.р} - \varphi_в = \varphi_{к.р} - \varepsilon_в$. Таким образом, эти характеристики позволяют оценивать надежность металла при проявлении этих нарушений.

Основываясь на этих представлениях, специалистами металлургической компании ООО "ВолгаСтальПроект" (г. Нижний Новгород) при участии кафедры "Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов" НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработана и прошла апробацию (в качестве распорядительного документа) методическая инструкция по определению энергетических характеристик деформируемости металла при испытании на растяжение.

Инструкция является дополнением к общепринятому стандарту ГОСТ 1497 "Металлы. Методы испытаний на растяжение" и устанавливает порядок проведения и обработки результатов испытаний с определением энергетических характеристик деформируемости металла, которые предполагается использовать при контроле его качества, проявляющегося в различных способах механической обработки и видах механического воздействия при эксплуатации.

Ниже рассмотрены основные положения, регламентирующие проведение испытаний с определением этих характеристик.

1. Испытания выполняют на цилиндрических образцах, типы и размеры которых используют в стандартных испытаниях на растяжение, предусматривая применение универсальных испытательных машин, оборудованных программно-техническим комплексом, фиксирующим кривые растяжения, как исходную информацию в проводимых анализах (рис. 3).

2. Полученные кривые проходят предварительную подготовку к анализу, предполагающую продолжение прямолинейного участка кривой до пересечения с осью удлинений ΔL для фиксирования т. I как фактического окончания упругого удлинения, и фиксирование ординаты $P_{упр}$ и соответствующей этой точке абсциссы, как начало пластического удлинения (т. 0).

3. График участка равномерного пластического удлинения подвергают компьютерной

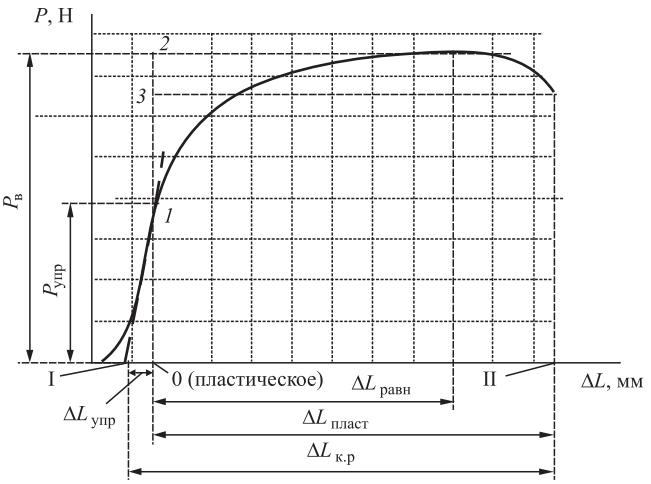


Рис. 3. Первичная кривая растяжения, подготовленная для проведения компьютерного анализа:

I, II — начало и конец (разрушение) удлинения при растяжении; т. 0 — предельное упругое удлинение и одновременно начальное пластическое удлинение

обработке с аппроксимацией в виде многочлена

$$P_i = k_0 + k_1\Delta L_i + k_2\Delta L_i^2 + k\Delta L_i^3 + k_4\Delta L_i^4, \quad (1)$$

где P_i, ΔL_i — координаты точек кривой; k_0—k_4 — фиксируемые коэффициенты многочлена.

Уравнение (1) позволяет фиксировать нагрузки при любом удлинении и далее определять напряжения, соответствующие любой точке кривой (см. рис. 2) с любым удлинением, включая точки в и к.р, которым соответствуют истинные напряжения $S_в$ и $S_{к.р}$.

Информацию, полученную по пп. 2 и 3, в совокупности с относительным удлинением после разрыва δ и относительным сужением после разрыва ψ, определяемыми в стандартном испытании, используют для определения всех рассматриваемых видов удельных работ и критериев пластической податливости.

4. Численное значение работы упругого удлинения и работы удлинения на площадке текучести (если она присутствует) определяют по формулам:

$$A_{упр} = 0,5\Delta L_{упр}P_{упр}; \; A_{тек} = \Delta L_{тек}P_{упр}. \quad (2)$$

Используя уравнение (1) как подынтегральную функцию, вычислением определенного интеграла в границах пластических удлинений от его начала 0 (пластич.) до значения $\Delta L_{равн}$ получаем работу равномерного пластического удлинения

$$A_{равн} = \int_0^{\Delta L_{равн}} P\Delta L d(\Delta L) =$$
$$= k_0\Delta L_{равн} + \frac{k_1\Delta L_{равн}^2}{2} + \frac{k_3\Delta L_{равн}^3}{3} + \quad (3)$$
$$+ \frac{a_3\Delta L_{равн}^4}{4} + \frac{k_4 L_{равн}^5}{5}.$$

Численные значения критериев податливости $k_{упр}$, $k_{равн}$ и $k_{соср}$ определяют по формулам:

$$\begin{aligned} k_{упр} &= a_{упр}/(100\varepsilon_{упр}); \\ k_{тек} &= a_{тек}/(100\varepsilon_{тек}); \\ k_{равн} &= a_{равн}/(100\varepsilon_{равн}); \\ k_{соср} &= a_{соср}/(100\Delta\varphi), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_{к.р} - \varphi_в$.

5. В случаях когда масштабы по координатным осям кривой удлинения не соответствуют фактическим значениям P и ΔL (при использовании отдельных графопостроителей), выполняют масштабирование координатных осей, используя получаемые в испытании значения $P_в$ и остаточного удлинения испытуемого образца после разрыва δ.

6. Данный анализ предполагается интегрировать в стандартизованный приемосдаточный контроль качества металла, проводимый на производствах, связанных с переработкой металла.

7. Учитывая, что процедура аппроксимации (п. 3) снижает оперативность проведения данного контроля, исследовали возможность определения в нем величины $a_{равн}$ по известной формуле [3]

$$a_{равн} = 0,50\left(S_{0,2} + S_в\right)\varepsilon_{равн}. \quad (5)$$

Геометрически формула (5) выражает собой площадь прямоугольной трапеции, вписанной в трапецию нн′вв′ (см. рис. 2), и рассчитываемая по ней удельная работа $a_{равн}$ априори меньше фактической удельной работы. При этом погрешность определения $a_{равн}$ по формуле (5) составляет в среднем 13 %, максимально — 25 % ($S_{0,2}/S_в$ = 0,3), минимально — 5 % ($S_{0,2}/S_в$ = 0,9).

Если формулу (5) представить как

$$a_{равн} = 0,56\left(S_{0,2} + S_в\right)\varepsilon_{равн}, \quad (6)$$

то погрешность уменьшится в среднем до 1 %, в целом — до ±15 %.

В связи с этим рассматриваемая инструкция допускает определять $a_{равн}$ по формуле (6) без аппроксимации графика кривой растяжения.

Если программное обеспечение испытательной машины обеспечивает фиксирование в результатах испытаний $\sigma_{0,2}$, $P_в$, $\delta_{равн}$ и $P_{к.р}$, то без определения удельных работ критерии податливости определяют по следующим формулам:

$$\begin{aligned} k_{упр} &= 0,5\sigma_{0,2}/100; \; k_{тек} = \sigma_{0,2}/100; \\ k_{равн} &\cong 0,56\left(\sigma_{0,2} + S_в\right)/100; \\ k_{соср} &= 0,50\left(S_в + S_{к.р}\right)/100. \end{aligned} \quad (7)$$

1. Характеристика исследуемых образцов

Номер образца	Материал	Термическая обработка
1	Сталь 10	Нормализация
2	Сталь 20	
3	Сталь 08ГДНФ	Закалка с последующим отпуском при 600 °С
4	Сталь 34ХН1МА	Закалка с последующим отпуском при 630 °С
5	Сталь 30ХГС	Закалка без отпуска
6		Закалка с последующим отпуском при 200 °С
7	Сталь 02Н18К9М5Т	Закалка без старения (аустенизация)
8		Закалка с последующим старением (530 °С)
9	Сплав на основе никеля ХН58МБЮ-ИД	Закалка без старения (аустенизация)
10		Закалка с последующим двукратным старением (800 и 700 °С)

8. Расчеты осуществляют с применением компьютерной программы Excel.

Предлагаемая методология апробирована испытаниями образцов сталей более 50 марок различного назначения, структурного состояния и классов прочности, а также сплава на никелевой основе, в значительной мере различающихся по уровню прочности и пластичности. В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены данные испытаний образцов 10 сплавов.

В табл. 3 сопоставлены диапазоны колебаний значений стандартных характеристик

2. Основные результаты испытаний образцов (выборка)

Образец	$S_{упр}$*	$S_в$	$S_{к.р}$	$\varepsilon_в$	$\varphi_{к.р}$	$a_{упр}$	$a_{тек}$	$a_{равн}$	$a_{соср}$	$k_{упр}$	$k_{тек}$	$k_{равн}$	$k_{соср}$
	Н					мДж/мм^3				мДж/мм^3 (Н/мм^2)**			
1	291	503	897	0,19	1,26	2,1	11,6	86	749	1,5	3,0	4,0	7,7
2	310	562	952	0,19	1,0	5,7	4,5	98	629	1,5	3,0	5,1	7,6
9	413	1301	1993	0,39	0,99	3,9	–	382	984	2,1	–	9,8	16,5
3	504	687	1383	0,13	1,4	9,8	6,3	89	1302	2,5	5	6,8	10,4
10	622	1413	1689	0,25	0,48	8,0	—	291	352	3,1	—	11,6	15,5
4	821	1030	1713	0,07	1,02	19,1	—	74	1299	4,1	—	10,6	13,7
7	902	1168	1879	0,03	1,25	22,2	—	36	1855	4,5	—	11,3	15,2
5	1261	2047	2368	0,06	0,36	29,0	—	112	660	6,3	—	18,9	22,1
6	1345	1895	2714	0,04	0,67	30,7	—	77	1456	6,7	—	18,5	23,0
8	1620	2034	2918	0,07	0,80	61,0	—	95	1876	8,1	—	20,0	24,8

* $S_{упр} \cong \sigma_{0,2}$; ** удельная работа, требуемая для увеличения $\varepsilon(\varphi)$ на 1 %.

3. Сопоставление колебаний значений различных характеристик

Характеристика	Диапазон значений	Отношение максимального значения характеристики к минимальному
$\sigma_{0,2}$, Н	291...1620	5,6
$\sigma_в$, Н	417...2034	4,9
δ, %	8...53	6,6
$a_{упр}$, мДж/мм^3	2,1...61	29,0
$a_{тек}$, мДж/мм^3	1,2...14,3	11,9
$a_{равн}$, мДж/мм^3	36...416	11,6
$a_{соср}$, мДж/мм^3	93...1879	20,2
$k_{упр}$, мДж/мм^3 (Н/мм^2)	1,5...8,1	5,4
$k_{тек}$, мДж/мм^3 (Н/мм^2)	2,5...11,8	4,7
$k_{равн}$, мДж/мм^3 (Н/мм^2)	4,0...20,0	5,0
$k_{соср}$, мДж/мм^3 (Н/мм^2)	7,6...24,8	3,3

прочности и пластичности и энергетических характеристик деформируемости, выявленных при испытаниях всех образцов.

Как видно из табл. 3, колебания значений критериев податливости соизмеримы с колебаниями значений стандартных характеристик, при этом колебания значений удельных работ существенно их превышают.

Таким образом, подтверждается значимость предлагаемых энергетических характеристик как оценочных показателей, характеризующих восприимчивость выбираемого для применения металла к деформированию при обработке и эксплуатации.

Заключение. Предложена, обоснована и апробирована методология определения в испытании на растяжение энергетических характеристик деформируемости металла при механическом воздействии в технологической обработке и эксплуатации: удельных работ упругого, равномерного и сосредоточенного удлинений; энергетических критериев податливости упругому, равномерному и сосредоточенному удлинениям.

Данная методология рекомендуется к применению для решения задач, связанных с выбором марок и технологических режимов упрочнения и разупрочнения металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Металловедение**: учебник. Т. 1 / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной и др.; под ред. В.С. Золоторевского. М.: Издательский дом МИСиС, 2009. 496 с.

2. **Терминологический** словарь. Металлы. Т. 2 / М.С. Блантер, В.Ю. Новиков и др. Москва—Запорожье: Мотор-Сич, 2005. 512 с.

3. **Скуднов В.А.** Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении. Н. Новгород: НГТУ, 2011. 198 с.

Роман Ефимович Глинер, д-р техн. наук,
gleen1@yandex.ru;
Евгений Борисович Катюхин;
Владислав Александрович Пряничников,
канд. техн. наук

УДК 621.77.4

А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Применение высокочастотных установок при формировании структурно-механических свойств сортового проката

Предложена ресурсосберегающая и более экологически чистая технология изготовления горячекатаного проката, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 10702 по упрочнению поверхности, механическим характеристикам и структуре проката, используемого для холодной объемной штамповки. Технология исключает дорогостоящие операции отжига в колпаковых печах и механическую обточку поверхностных дефектов. При этом калиброванный прокат обладает высокой способностью к холодному пластическому деформированию.

Ключевые слова: горячекатаный и калиброванный прокат; волочение; степень деформации; упрочнение проката; механические характеристики; нагрев токами высокой частоты; рекристализационный отжиг; механическая обточка.

Resource saving and more environmentally friendly technology for manufacturing of hot-rolled steel that meets satisfying requirements of GOST 10702 of surface hardening, mechanical characteristics and structure of rolled products used for cold forging is offered. The technology excludes expensive operations of annealing in bell-type furnaces and mechanical turning of surface defects. Thus calibrated rolling has high ability to cold plastic deformation.

Keywords: hot-rolled and calibrated rolling; drawing; degree of deformation; hardening of rolled metal; mechanical characteristics; high-frequency heating; recrystallization annealing; mechanical turning.

При разработке конкурентоспособных технологий производства калиброванного проката необходимо предложить дополнительные резервы повышения качества металлопродукции в процессе технологического передела, начиная от оптимизации структуры металла, технологии его деформации [1] и заканчивая различными способами подготовки поверхности перед холодной объемной штамповкой [2—4]. Такие технологические методы должны привести не только к чисто экономическому эффекту, но и снизить нагрузки на формообразующий инструмент и усложнить геометрию крепежных изделий.

Наиболее распространенной термической операцией подготовки проката из среднеуглеродистых и легированных сталей перед холодной объемной штамповкой является отжиг на зернистый перлит в камерных или колпаковых печах [5, 6]. Продолжительность отжига в данных печах составляет 24 ч и более. Однако даже после такой длительной термической выдержки в структуре металлопроката встречаются участки со следами пластинчатого перлита и не обеспечивается по всей длине мотка равномерность свойств, необходимых для дальнейшей технологической обработки в целях получения из него крепежа методом холодной объемной штамповки.

В производстве любых крепежных изделий и проволоки к горячекатаному и калиброванному прокату предъявляют нормативные тре-

бования в отношении механических характеристик, эксплуатационной долговечности и состоянию поверхностного слоя [7]. Одновременно возрастает потребность в снижении затрат изготовления крепежа различного назначения, экономии материальных и энергетических ресурсов [8], а также снижении рисков безопасности производственных процессов и решения острых экологических проблем.

Индукционный нагрев проката токами высокой частоты (ТВЧ) — наиболее дешевое и технически совершенное средство для нагрева поверхности сортового проката. Основоположником метода индукционной обработки и внедрения в промышленности использования ТВЧ является профессор В.П. Вологдин. Он разработал теорию индукционного нагрева и создал первые промышленные установки. Ему принадлежит мировой приоритет в данной области (см. кн.: Вологдин В.П. Поверхностная закалка индукционным способом. М.: Металлургия, 1939. 244 с.).

К технологическим свойствам металла, подвергаемого холодной высадке, относятся его способность выдерживать без разрушения испытание на осадку под воздействием деформируемого инструмента. Наилучшая способность сталей к холодной высадке практически обеспечивается в том случае, если образец выдерживает испытание на осадку до 1/3 Н и менее. Эффективность волочильного производства ограничена рассогласованием скоростей процессов на различных его этапах. Производство проката включает в себя операции подготовки к волочению, первичному волочению, промежуточной термической обработки, повторному волочению и заключительной термической обработки.

На современном этапе развития производства калиброванного проката при ухудшении экологической обстановки и истощении природных ресурсов требуются разработки ресурсосберегающих технологий для получения заготовок с требованиями, удовлетворяющими ГОСТ 10702.

Термическая обработка — наиболее распространенная технологическая операция при изготовлении крепежных изделий. Термический нагрев проката способом ТВЧ длится не более 6 мин. Для медленного охлаждения мотков металла используют термоемкости, в которых охлаждение длится не более 4 ч. В процессе разработки ресурсосберегающих технологий получения калиброванного проката важным звеном является структурный подход при подготовке сортового металлопроката, обеспечивающий функциональное управление его свойствами за счет изменения дисперсности зерна, количества и морфологии фазовых составляющих.

На современном этапе развития проволочного производства наиболее распространенной термической операцией подготовки проката из среднеуглеродистых и легированных сталей перед холодной объемной штамповкой является отжиг на зернистый перлит в колпаковых печах с защитной атмосферой в течение до 36 ч. Но даже после такой длительной термической выдержки в структуре металлопроката могут встречаться участки со следами пластинчатого перлита и не обеспечивается равномерность свойств по всей длине мотка.

К крепежным изделиям предъявляют повышенные требования к наличию и глубине поверхностных дефектов, наличию обезуглероженного слоя и качеству поверхностного слоя. В действующих технологиях подготовки горячекатаный прокат подвергают пластическому упрочнению и снятию недопустимых дефектов поверхности путем дорогостоящей операции обточки. Подобная технологическая операция приводит к значительному удорожанию метизных изделий, что негативно отражается на конкурентоспособности выпускаемых крепежных изделий, металлоконструкций, автомобилей и т.д. [9].

Существующая проблема производства проволоки и проката без отжига на структуру зернистого перлита и рекристаллизационного отжига в колпаковых печах, а также обточки поверхности проката представляет собой актуальную задачу для волочильного производства.

Приоритетным направлением в решении этой задачи является снижение стоимости

производимого проката и проволоки за счет рационализации структурного подхода при изготовлении, когда обеспечивается функциональное управление свойствами стали.

Оптимизация формирования структурно-механических свойств связана с использованием фактора степени упрочнения, положительного влияния механоэлектротермической подготовки структурно-механических свойств металла на изменение механических характеристик, микроструктуры и глубины обезуглероженного слоя проката. При этом предполагается достижение уровня механических свойств и качества поверхности, регламентируемых ГОСТ 10702.

Данное техническое решение подкреплено накопленным опытом метизного производства, свидетельствующим о возможности при подготовке горячекатаного проката отказаться в ряде случаев от традиционного термического отжига проката в печах. Негативные проявления традиционного термического отжига в полной мере относятся к калиброванному прокату для изготовления ответственного крепежа для автомобильной промышленности. Предлагаемое техническое решение не исключает термического отжига, но он осуществляется с помощью индукционного нагрева, так как обеспечивает высокую стабильность поддержания температурного режима и исключает образование обезуглероженного слоя.

Для исследования использовали сталь 40Х с химическим составом по ГОСТ 10702, широко применяемую для изготовления упрочняемых крепежных изделий.

Существующий вариант изготовления калиброванного проката диаметром 9,65 мм:

- исходное состояние — горячекатаный прокат диаметром 12 мм;
- сфероидизирующий отжиг в печи с защитной атмосферой при температуре 750 °С (общее время отжига 24 ч);
- травление металлопроката в растворе серной кислоты;
- волочение проката с диаметра 12 мм на диаметр 11 мм (степень обжатия 16 %);
- рекристаллизационный отжиг в печи с защитной атмосферой при температуре 670 °С (общее время отжига 12 ч);
- травление металлопроката в растворе серной кислоты;
- волочение проката с диаметра 11 мм до диаметра 10,2 мм (степень обжатия 14 %);
- обточка проката с диаметра 10,2 мм на диаметр 9,97 мм с последующим волочением с диаметра 9,97 мм на диаметр 9,65 мм (степень обжатия 6 %);
- покрытие смазочным материалом проката диаметром 9,65 мм.

Обточку калиброванного проката проводят в целях удаления поверхностных дефектов и устранения обезуглероженного слоя, образовавшегося во время отжига при термической обработке. При обточке поверхности металлопроката кроме наклепа возникают и другие недопустимые дефекты поверхности.

Для исключения появления поверхностных дефектов при травлении, термической обработке и обточке предложен вариант схемы подготовки проката для последующей высадки крепежа.

Предлагаемый вариант подготовки проката с применением нагрева металла токами высокой частоты:

- исходное состояние — горячекатаный прокат диаметром 12 мм;
- травление проката;
- волочение с диаметра 12 мм на диаметр 11 мм (степень обжатия 15,9 %);
- отжиг ТВЧ при температуре 760...780 °С;
- травление проката;
- волочение с диаметра 11 мм на диаметр 9,65 мм (степень обжатия 23 %);
- отжиг ТВЧ при температуре 760...780 °С;
- травление проката;
- волочение через фильер диаметром 9,65 мм (в пределах упругой деформации).

Суммарное обжатие 38,9 %.

Степень обжатия при волочении проката определяли по формуле:

$$q = 100\frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2}, \qquad (1)$$

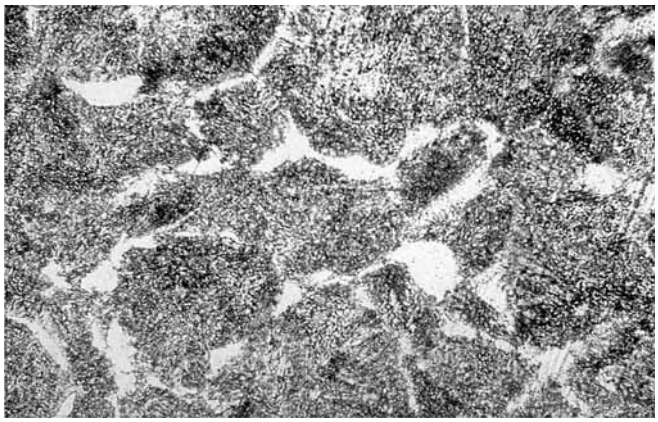


Рис. 1. Микроструктура стали 40Х диаметром 12 мм. ×500

где d_0, d_1 — диаметр образца проката до и после волочения соответственно, мм.

Микроструктура, механические свойства горячекатаного проката стали 40Х диаметром 12 мм приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Микроструктура горячекатаного проката стали 40Х диаметром 12 мм представляет собой перлит + феррит (см. рис. 1).

Из анализа результатов табл. 1 следует, что горячекатаный прокат имеет по длине неравномерные механические характеристики.

Прочностные характеристики образцов, взятых от внутренних и внешних концов мотка проката, различны: $\sigma_в$ и $\sigma_{0,2}$ выше у внешних концов и ниже у внутренних концов мотка. Это связано с более высокой скоростью охлаждения внешней стороны мотка после охлаждения на столе прокатного стана на металлургическом комбинате. Микроструктура образцов от внешних концов мотка проката более мелкодисперсная, хотя составляющая ее одинаковая. Пластические характеристики и твердость образцов от внешних и внутренних концов мотка проката практически одинаковые.

После отжига способом ТВЧ микроструктура проката становится менее мелкодисперсной и более равномерной по сравнению с микроструктурой горячекатаного проката. Такое изменение структурного состояния приводит к снижению прочностных характеристик, твердости и повышению пластичности.

Микроструктура, изменение механических характеристик и твердости на переходах при изготовлении калиброванного проката стали 40Х по предложенному варианту показаны на рис. 2 и в табл. 2.

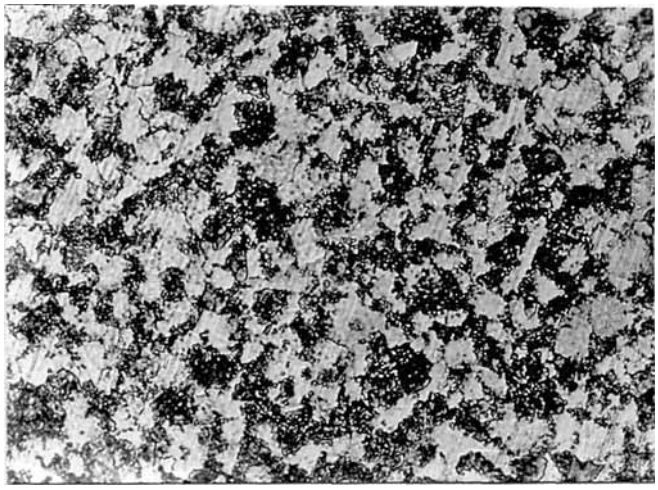


Рис. 2. Микроструктура стали 40Х диаметром 9,65 мм. ×500

1. Механические свойства исходного горячекатаного проката стали 40Х диаметром 12 мм

Прокат	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	ψ, %	HB
	МПа			
Внутренний конец мотка	770	530	58,5	255
	652	545	60,5	255
	788	540	58,0	255
Внешний конец мотка	870	640	57,5	255
	743	655	59,0	255
	880	640	57,5	255

2. Механические свойства, глубина обезуглероженного слоя, качество поверхности проката стали 40Х при изготовлении калиброванного проката по предложенному варианту

Состояние проката	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	ψ, %	НВ	Наличие и глубина обезуглероженного слоя, мм	Качество поверхности
	МПа					
Горячекатаный прокат диаметром 12 мм	760	57,0	59	255	Частичное, 0,2	Дефектов нет
Горячекатаный прокат диаметром 12 мм, после отжига с нагревом ТВЧ	660	380	61	255	Нет	
Прокат диаметром 11 мм	820	510	59	269	Нет	
Прокат диаметром 11 мм после отжига с нагревом ТВЧ	720	440	60	255	Частичное, 0,1	
Прокат диаметром 9,65 мм	910	850	61	256	Нет	
Прокат диаметром 9,65 мм после отжига с нагревом ТВЧ	730	460	64	190	Местное, частичное, 0,1	
После волочения через фильер диаметром 9,65 мм	740	480	63	190		

С увеличением числа отжигов с нагревом металла ТВЧ при температуре 760...780 °С после холодной пластической деформации волочением наблюдается значительное изменение микроструктурного состояния, а именно сорбитообразный перлит становится менее дисперсным, а после отжига на диаметре 11 мм в структуре появляется мелкозернистый перлит.

После четвертого отжига на окончательном размере (диаметр 9,65 мм) достигается формирование равномерной микроструктуры, состоящей из мелкозернистого и точечного перлита и равномерно распределенного феррита. Твердость проката с такой микроструктурой не превышает 194 НВ. Волочение проката через фильер в количестве трех раз после проведения термической обработки с нагревом способом ТВЧ способствует постоянному упрочнению калиброванного проката, при этом его эллипсность на диаметре 9,65 мм отсутствует.

Выводы

1. Благодаря трехразовому волочению с оптимальными степенями обжатия и отсутствию окалины после отжигов с нагревом способом ТВЧ достигается качество поверхности калиброванного проката и его упрочнение, соответствующие требованиям ГОСТ 10702. После проведения достаточного числа волочильных операций отсутствует эллипсность на окончательном размере проката.

2. Калиброванный прокат, изготовленный по предложенной схеме, имеет равномерную и менее дисперсную микроструктуру.

3. После отжига с нагревом металла ТВЧ на поверхности проката возникает незначительный налет оксидов, который удаляли при травлении в растворе серной кислоты в течение нескольких секунд. Использование кислоты возможно минимизировать.

4. Калиброванный прокат, изготовленный по предложенному варианту, обладает высокой способностью к холодному пластическому деформированию.

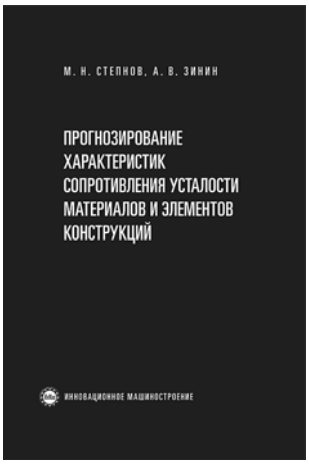
5. Предлагаемый технологический процесс экологически более чистый, чем существующий на производстве за счет исключения использования печей с защитной атмосферой и снижения применения серной кислоты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пачурин Г.В., Галкин В.В., Пачурин В.Г.** Долговечность упрочненных металлов и сплавов: учеб. пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 228 с.
2. **Пачурин Г.В., Власов В.А., Чиненков С.В.** Механические свойства листовых конструкционных сталей при пониженных и повышенных температурах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 4. С. 3—8.
3. **Кузов** современного автомобиля: материалы, проектирование и производство: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, С.М. Кудрявцев, Д.В. Соловьев, В.И. Наумов; под ред. Г.В. Пачурина. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 2016. 316 с.
4. **Low-Cost** Treatment of Rolled Products Used to Make Long High-Strength Bolts / A.A. Filippov, G.V. Pachurin, V.I. Naumov, N.A. Kuzmin // Metallurgist. 2016. Vol. 59. No. 9—10. January. P. 810—815.
5. **Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Чиненков С.В.** Формирование структурно-механических свойств стальных заготовок для упрочненных болтов. Н. Новгород: НГТУ, 2012. 151 с.
6. **Филиппов А.А., Пачурин Г.В.** Подготовка проката для высокопрочных болтов: учеб. пособие / под общ. ред. Г.В. Пачурина. Старый Оскол: ТНТ, 2015. 176 с.
7. **Влияние** поверхностного и структурного состояния на качество проката для болтов / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин, В.И. Наумов, Н.А. Кузьмин // Фундаментальные исследования. 2015. № 10—1. С. 77—82.
8. **Pachurin G.V., Filippov A.A.** Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // Russian Engineering Research. 2008. Vol. 28. № 7. P. 670—673.
9. **Филиппов А.А., Пачурин Г.В.** Ресурсосберегающая подготовка стального проката к холодной высадке крепежных изделий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8—4. С. 23—29.

Алексей Александрович Филиппов, канд. техн. наук,
tugarino@mail.ru;
Герман Васильевич Пачурин, д-р техн. наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



Степнов М.Н., Зинин А.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

М.: Инновационное машиностроение, 2016. 392 с.

Цена 1000 руб.

Монография содержит систематическое изложение существующих расчетных методов оценки характеристик сопротивления усталости традиционных конструкционных и новых композитных материалов на основе полимерной матрицы, а также методов расчета выносливости типовых элементов высоконагруженных конструкций.

Методология расчетных методов определения характеристик выносливости основана на использовании статистических данных о характеристиках механических свойств материалов при кратковременном нагружении и экспериментально обоснованных моделей учета влияния различных факторов на несущую способность конструкций при циклическом нагружении. Показано, что применение предлагаемых расчетных методов обеспечивает достаточно высокую точность оценки характеристик сопротивления усталости, не уступающую показателям точности экспериментальных исследований. Особое внимание уделено вопросам возможности оценки характеристик усталости полимерных композитных материалов в зависимости от их структурных параметров и особенностей механического поведения и механизмов усталостного разрушения.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторских и технологических бюро, лабораторий механических испытаний, научных сотрудников, аспирантов и студентов механических специальностей.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

УДК 621.9.048

А.А. Хлыбов, М.О. Кувшинов
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя аустенитной стали 12Х18Н10Т

На примере аустенитной стали 12Х18Н10Т показано, что при воздействии ультразвука в поверхностном слое изменяется микроструктура, повышается микротвердость, формируются сжимающие напряжения.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование; ультразвуковое упрочнение; структура; фазовый состав; микротвердость; сжимающие остаточные макронапряжения.

Using the example of austenitic steel 12Kh18N10T, it is shown that when the ultrasound is exposed to the surface layer, the microstructure changes, the microhardness is increased, compressive stresses are formed.

Keywords: surface plastic deformation; ultrasonic simplification; structure; phase composition; microhardness; compressive residual macrostresses.

Введение. Работоспособность и надежность деталей, узлов, изделий во многом определяются свойствами и состоянием их поверхностного слоя.

Известно, что свойства поверхностного слоя значительно отличаются от свойств основного металла. Схематично поверхностный слой показан на рис. 1 [1, 2].

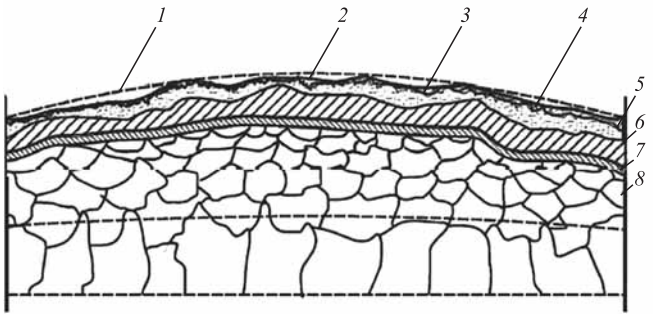


Рис. 1. Схематичное изображение поверхностного слоя детали:

1 — макроотклонение; *2* — волнистость; *3* — шероховатость; *4* — субшероховатость; *5* — адсорбированная зона; *6* — зона оксидов; *7* — граничная зона материала; *8* — зона материала с измененными физико-механическими свойствами

Состояние поверхностного слоя металла оценивается единичными или комплексными параметрами, характеризующими: геометрию поверхности (шероховатость); физическое состояние (кристаллографическая структура, фазовый состав); химический состав (концентрация элементов сплава, степень взаимодействия компонентов сплава); механическое состояние (пластическая деформация, остаточные напряжения). Эти характеристики связаны между собой [3].

К основным свойствам, значительно влияющим на характеристики поверхностного слоя, относятся: шероховатость, микротвердость, величина и знак внутренних остаточных напряжений.

Для создания требуемых физико-механических характеристик применяют различные методы модифицирования поверхностного слоя: термическую обработку, поверхностное легирование, поверхностную пластическую деформацию.

Методы поверхностного пластического деформирования (накатывание, алмазное выглажи-

вание, дорнование, дробеструйная обработка, ультразвуковая обработка, чеканка, галтовка и др.) имеют преимущества по сравнению с другими методами обработки: благодаря пластическому течению металла деформированные выступы заполняют впадины профиля, увеличивая опорную длину и несущую способность поверхности. В результате деформации происходит формирование упрочненного слоя с равномерным градиентом спада микротвердости, остаточных сжимающих напряжений и глубины наклепа.

Один из перспективных видов *поверхностно-пластической деформации* (ПДД) для модифицирования поверхности — технология ультразвуковой ударной обработки или ультразвуковая финишная обработка. Данный метод поверхностного упрочнения обеспечивает изменение дислокационной структуры в поверхностном слое обрабатываемого материала, измельчение зерен до наноразмера, увеличение углов разориентировки дислокационных фрагментов и др.

Физическая природа, характеризующая процесс ультразвуковой ударной обработки, сложна и связана с такими явлениями, как удар, деформация, поверхностное трение и адгезионные явления, диссипация и преобразование механической энергии удара в тепло, колебания с частотой возбуждающей силы, волновые процессы и др.

Упрочнение и формирование поля остаточных напряжений в процессе ультразвуковой ударной обработки изделия являются результатом комплексного воздействия на материал мощных колебаний с частотой ультразвука и пластического деформирования поверхностного слоя вследствие многократных периодических ударов инструмента.

Процесс пластического деформирования характеризуется искажением кристаллической решетки с интенсивным зарождением, движением и закреплением дислокаций. При этом число дислокаций в деформированном поверхностном слое увеличивается на несколько порядков. Закрепление дислокаций происходит по границам разориентированных фрагментов и блоков, образующихся в результате раздробления кристаллов, которые препятствуют сдвиговой деформации. Сопротивление прохождению дислокаций является основной причиной упрочнения поверхностного слоя при ППД. Увеличение плотности дислокаций наряду с фазовыми превращениями и неравномерностью нагрева очага деформации приводят к увеличению удельного объема деформированного металла.

Сопротивление упруго деформированных слоев под упрочненным поверхностным слоем является причиной формирования в поверхностном пластически деформированном слое напряжений сжатия, которые уравновешиваются расположенными под поверхностным слоем растягивающими напряжениями. При этом на формирование, величину и распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя влияют деформация, тепловые процессы и фазовые превращения в материале. Образование и накопление несовершенств кристаллической решетки происходят до исчерпания способности материала к дальнейшей деформации, после чего наступает разрушение поверхности с формированием растягивающих напряжений [4].

С точки зрения структурно-фазовых изменений, происходящих при деформировании поверхностного слоя металла, пластическая деформация распространяется по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям.

Внутри зерен, представляющих собой совокупность блоков однородно ориентированных кристаллических решеток (в узлах которых находятся атомы) и первоначально имеющих различную ориентировку и межзеренные границы, за счет петель Франка—Рида происходят интенсивное образование и движение дислокаций — линейных дефектов кристаллической решетки в виде лишней атомной полуплоскости — экстраплоскости, образованной сдвигом части решетки, в результате чего их число увеличивается на несколько порядков. Дислокации перемещаются внутри зерен по плоскостям скольжения эстафетным путем. Внутри одного зерна дислокации взаимодействуют между собой и с точечными дефектами кристаллического строения — вакансиями, межузельными и примесными атомами.

При пластической деформации наблюдаются раздробление кристаллов на фрагменты и новые блоки с большими искажениями решетки на границах, а также увеличение степени разориентированности фрагментов и блоков, что служит препятствием для сдви-

говой деформации, которая происходит главным образом по внутрикристаллическим плоскостям скольжения. Зерна приобретают определенную форму и ориентацию, вытягиваясь в направлении главной деформации и создавая текстуру деформации, что приводит к анизотропии механических свойств. Вокруг дефектов кристаллическая решетка сильно деформируется и в зернах возникает поле напряжений второго рода — остаточные микронапряжения, уравновешивающиеся в объемах, соизмеримых с размерами самих зерен.

Таким образом, пластическое деформирование, сопровождающееся дроблением блоков и увеличением плотности дислокаций внутри зерен, приводит к повышению числа границ, затрудняющих сдвиговые процессы и блокирующих последующее перемещение (торможение) дислокаций. В результате этого способность искаженной решетки к дальнейшей деформации оказывается исчерпанной.

В наклепанном металле плотность дислокаций достигает $10^{11}...10^{12}$ см$^{-2}$. При этом в интервале $10^{5}...10^{8}$ см$^{-2}$ плотность дислокаций характеризуется минимальным сопротивлением разрыву, что соответствует структуре металла после отжига. При уменьшении количества дислокаций число дефектов кристаллической решетки снижается и ее прочность приближается к теоретической, а при увеличении их числа прочность возрастает в связи с сопротивлением дальнейшему перемещению. Таким образом, деформация кристаллической решетки, приводящая к образованию скопления дислокаций, является причиной упрочнения металла при ППД.

Материал и методы исследования. В качестве материала исследования использовали сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т с химическим составом, соответствующим ГОСТ 5632—72: ⩽0,8 % Si; ⩽2,0 % Mn; ⩽0,3 % Cu; 9,0...11,0 % Ni; ⩽0,002 % S; 0,6...0,8 % Ti; ⩽ 0,12 % C; ⩽0,053 % P; 17,0...19,0 % Cr.

Упрочняющую обработку проводили на установке, состоящей из ультразвукового генератора IL 10-0.63 и ультразвуковой колебательной системы, на частоте 22 кГц. Обработку образцов осуществляли индентором из вольфрамового твердого спеченного сплава ВК8.

Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства стали по глубине образца исследовали при силе прижима ультразвукового индентора F_N = 50, 100, 150 и 200 Н.

Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,981 Н (100 гс) по ГОСТ 9450—76.

Измерения остаточных макронапряжений поверхностного слоя проводили с помощью автоматического многофункционального рентгеновского дифрактометра общего назначения типа ДРОН.

Микроструктуру и микротвердость изучали на поперечных шлифах по глубине воздействия упрочняющей ультразвуковой обработки. Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Axiovert 200MAT с использованием системы анализа изображений "ВидеоТесТ — Размер 5.0" на образцах, подвергнутых электролитическому травлению в 10%-ном водном растворе щавелевой кислоты при плотности тока 1 А/см^2.

Результаты исследований. На рис. 2 приведена микроструктура стали 12Х18Н10Т в исходном состоянии.

Микроструктура стали 12Х18Н10Т состоит из аустенитных зерен с двойниками и расположенных строчечно вдоль проката неметаллических включений (карбонитридов титана и др.). Средний диаметр зерна аустенита ~31 мкм.

На рис. 3 показаны микроструктуры стали 12Х18Н10Т после ультразвуковой ударной обработки при различных значениях силы прижима индентора F_N.

Микроструктура поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т после ультразвукового ударного деформирования состоит из мартенсита деформации, наблюдается значительное измельчение зерен в поверхностном слое.

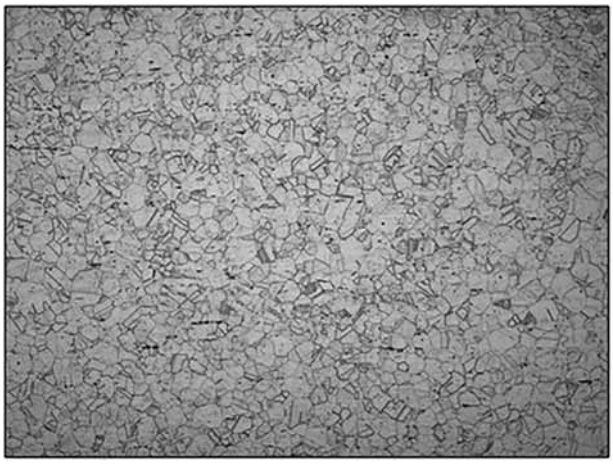


Рис. 2. Микроструктура стали 12Х18Н10Т в исходном состоянии. ×100

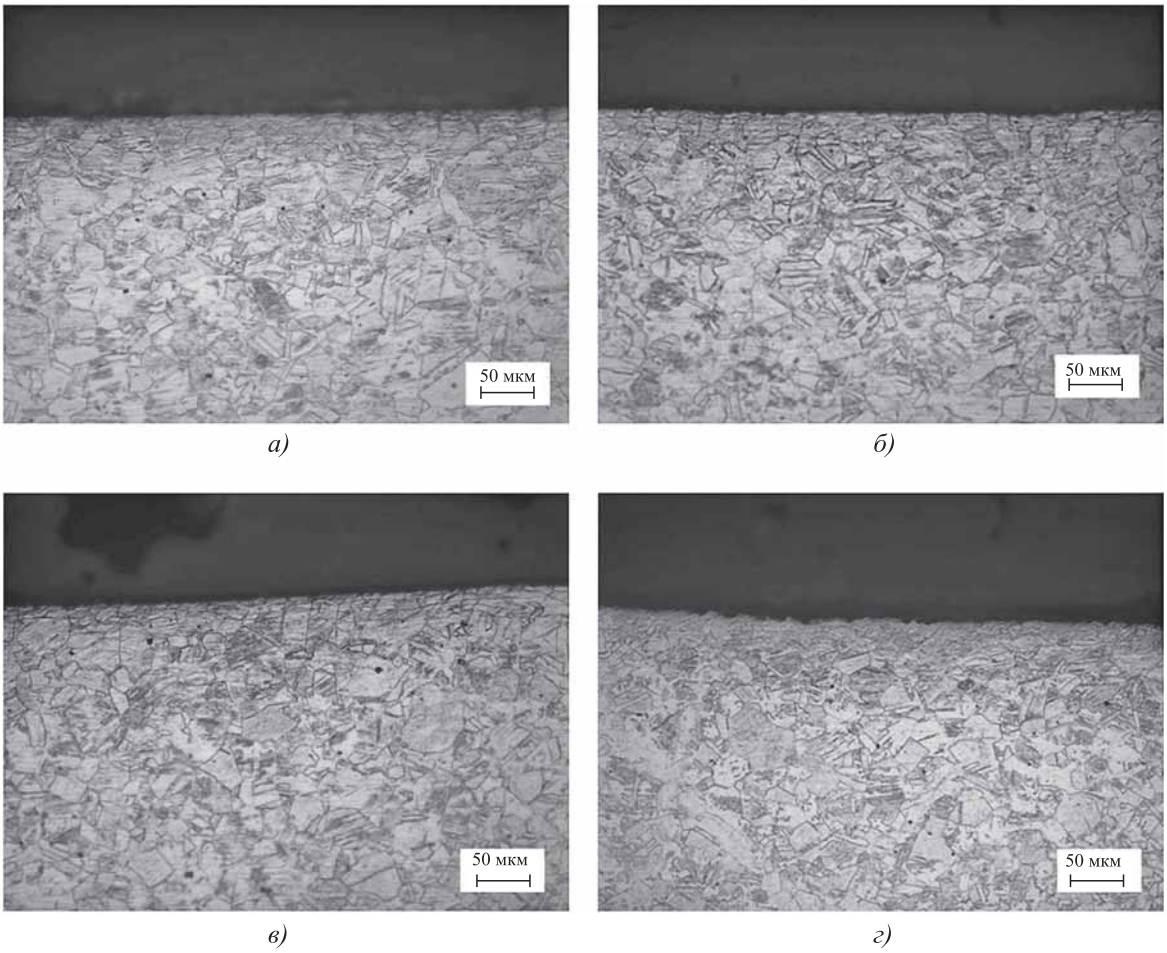


Рис. 3. Микроструктура стали 12Х18Н10Т после ультразвуковой ударной обработки:
а — F_N = 50 Н; *б* — 100 Н; *в* — 150 Н; *г* — 200 Н

Микротвердость является важным механическим показателем качества поверхностного слоя деталей, определяющим способность металла сопротивляться деформации и влияющим на прочность, износостойкость, сопротивление усталости и коррозионную стойкость. В таблице представлены средние значения микротвердости образцов до и после ультразвуковой ударной обработки.

Анализ изменения микротвердости по глубине поверхностного слоя (рис. 4) показал, что при удалении от поверхности уровень микротвердости уменьшается и достигает исходного значения.

Средняя микротвердость образцов до и после ультразвуковой ударной обработки

Микротвердость, HV, до/после обработки при силе прижима индентора, Н			
50	100	150	200
197,1/230,3	201,7/272,1	198,6/303,3	199,5/347,3

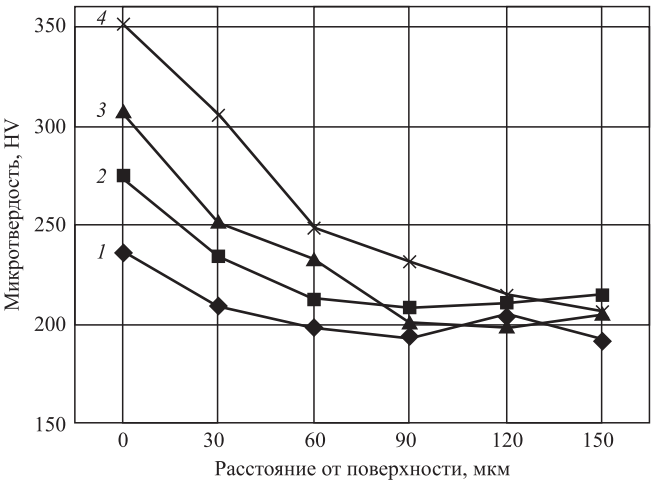


Рис. 4. Результаты измерения микротвердости по глубине:
1 — F_N = 50 Н; *2* — 100 Н; *3* — 150 Н; *4* — 200 Н

Степень упрочнения υ поверхностного слоя образцов после ультразвуковой ударной обработки определяли по формуле

$$\upsilon = \frac{H_{упр} + H_{исх}}{H_{исх}} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где $H_{упр}$, $H_{исх}$ — микротвердость упрочненной и исходной поверхностей.

Результаты расчета степени упрочнения в зависимости от режима обработки: υ_{50} = 16,8 %; υ_{100} = 34,9 %; υ_{150} = 52,7 %; υ_{200} = 74,1 %.

Остаточные сжимающие макронапряжения являются важным механическим показателем качества поверхностного слоя деталей, определяющим максимальные внешние нагрузки, воздействие которых способен выдержать металл до разрушения при заданном числе циклов, и влияющим на прочность, износостойкость, сопротивление усталости и коррозионную стойкость.

В исходном состоянии остаточные макронапряжения поверхностного слоя 35...0 МПа (рис. 5). После ультразвуковой ударной обработки в поверхностном слое появились сжимающие остаточные макронапряжения, имеющие максимум на поверхности: $\sigma_{ост\,50}$ = = 345 МПа; $\sigma_{ост\,100}$ = 390 МПа; $\sigma_{ост\,150}$ = = 440 МПа; $\sigma_{ост\,200}$ = 490 МПа.

Уровень сжимающих макронапряжений увеличивается с ростом степени деформации (силы прижима индентора) поверхности, данная зависимость носит логарифмический характер, что соответствует кривой упрочнения стали 12Х18Н10Т. Это свидетельствует о том, что в процессе деформации не был превышен предел прочности материала или допущен перегрев, сопровождаемые снижением показателей качества поверхности.

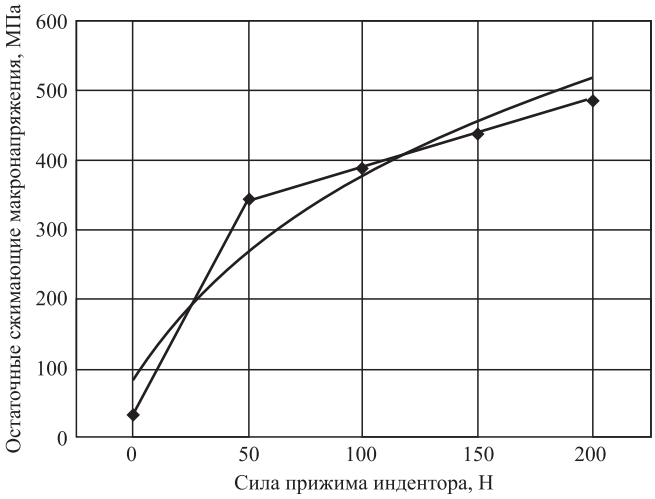


Рис. 5. Зависимость остаточных сжимающих макронапряжений поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т от режима обработки

Заключение. В процессе ультразвуковой ударной обработки между деформирующим элементом и обрабатываемой поверхностью возникает периодический контакт с частотой ультразвуковых колебаний. В момент контакта мгновенные напряжения выше средних, что вызывает значительную пластическую деформацию и, как следствие, изменение структуры и свойств поверхности и поверхностных слоев обрабатываемого материала.

На основании экспериментальных исследований влияния ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства стали 12Х18Н10Т сделаны следующие выводы:

— микротвердость поверхностного слоя увеличивается от исходного значения ~200 HV до 230,0...247,3 HV. Установлена закономерность повышения микротвердости и степени упрочнения при увеличении силы прижима индентора;

— остаточные макронапряжения поверхностного слоя повышаются: от исходного значения 35...0 МПа до сжимающих остаточных напряжений 345...490 МПа. Установлена закономерность возрастания напряжений при увеличении силы прижима индентора;

— микроструктура поверхностного слоя значительно упрочняется вследствие формирования в поверхностном слое мелкозернистой структуры и повышения плотности дислокаций.

Таким образом, показана возможность применения ультразвуковой ударной обработки для повышения характеристик поверхностных слоев стали 12Х18Н10Т.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

2. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

3. **Суслов А.Г.** Инженерия поверхности деталей / кол. авт. под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

4. **Кулемин А.В.** Поглощение ультразвука в металлах в процессе их пластической деформации // Акустический журнал. 1980. Т. 26. № 5. С. 735—740.

Александр Анатольевич Хлыбов, д-р техн. наук,
Hlybov_52@mail.ru;
Максим Олегович Кувшинов

УДК 669.14.018.54

В.В. Глебов
(Волжский государственный университет водного транспорта),
В.М. Блинов
(Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН)

Коррозионно-механические свойства стали 05Х22АГ14Н7М

Исследованы коррозионно-механические характеристики высокопрочной нержавеющей стали 05Х22АГ14Н7М с повышенным содержанием азота (0,65...0,75 % мас.). Установлено, что сталь 05Х22АГ14Н7М имеет сочетание высоких прочностных и пластических свойств и может быть рекомендована для изготовления ответственных немагнитных деталей судового машиностроения.

Ключевые слова: аустенитная коррозионно-стойкая сталь; азотсодержащая сталь; коррозия; сопротивление усталости; механические свойства.

The corrosion and mechanical characteristics of high-strength stainless steel 05Kh22AG14N7M with increased nitrogen content (0.65...0.75 % mas.) are studied. It is established that steel 05Kh22AG14N7M has combination of high strength and plastic characteristics and can be recommended for the manufacture of responsible non-magnetic parts of shipbuilding.

Keywords: austenitic corrosion-resistant steel; high nitrogen steel; corrosion; fatigue strength; mechanical properties.

В машиностроении при изготовлении ответственных деталей судовых машин и механизмов необходимы аустенитные коррозионно-стойкие стали с высокими прочностными и пластическими характеристиками.

Основными недостатками применяющихся высокопрочных ($\sigma_{0,2} \geqslant 600$ МПа) нержавеющих немагнитных дисперсионно-твердеющих сталей являются их пониженная пластичность и вязкость разрушения, не обеспечивающие необходимого ресурса работы [1].

Поэтому была разработана сталь 05Х22АГ14Н7М (табл. 1) с твердорастворным упрочнением за счет повышения содержания азота до 0,65...0,75 % с пределом текучести $\sigma_{0,2} > 550$ МПа и ударной вязкостью $KCV > 0,5$ МДж/м^2 [2, 3].

В связи с тем, что в литературе мало сведений о коррозионно-механических характеристиках высокопрочных нержавеющих сталей с повышенным содержанием азота, были исследованы данные свойства этих сталей.

В табл. 2 приведены механические и коррозионные свойства сталей 05Х22АГ14Н7М и 12Х18Н10Т в состоянии после закалки.

Сталь 05Х22АГ14Н7М отличается сочетанием высоких значений прочностных и пластических свойств (см. табл. 2), что объясняется повышенным содержанием азота (см. табл. 1).

В табл. 3 приведены коррозионные характеристики сталей 05Х22АГ14Н7М и 12Х18Н10Т в морской воде. Установлено, что сталь 05Х22АГ14Н7М не склонна к коррозионному растрескиванию в морской воде [4].

Также были выполнены исследования усталостной долговечности стали 05Х22АГ14Н7М на образцах диаметром 10 мм при чистом изгибе

1. Химический состав сталей 05Х22АГ14Н7М и 12Х18Н10Т, %

Сталь	C	Cr	Mn	Ni	Si	Mo	V	N	Ti
05Х22АГ14Н7М	0,054	22,5	12,0	7,6	0,20	0,75	0,25	0,69	—
12Х18Н10Т	0,12	18,0	⩽2,0	10,0	⩽0,8	—	—	—	0,7
Примечание. Содержание S и P менее 0,025 %.									

2. Механические и коррозионные свойства аустенитных сталей 05Х22АГ14Н7М и 12Х18Н10Т

Сталь	Механические свойства					Склонность к межкристаллитной коррозии	Режим термообработки
	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	*KCV*, МДж/м^2		
	МПа		%				
05Х22АГ14Н7М	590	960	60	70	2,0	Нет	Закалка, 1070 °С, вода
12Х18Н10Т	230	560	46	66	1,5		

3. Коррозионные характеристики сталей 05Х22АГ14Н7М и 12Х18Н10Т в морской воде

Сталь	Скорость коррозии, г/(м^2·ч)	Потенциал коррозии, В
05Х22АГ14Н7М	0,0008	+0,25
12Х18Н10Т	0,00081	+0,06

с вращением на базе 10^7 циклов на воздухе и в морской воде. Результаты представлены на рис. 1.

Структуру стали 05Х22АГ14Н7М исследовали методами оптической металлографии на микроскопе ММР-2 (рис. 2) и электронной микроскопии на микроскопе JEM-150 (рис. 3).

Структура стали аустенитная (HV ~ 360 МПа) с размером зерна 30...100 мкм и небольшим количеством пластинчатых выделений нитридов хрома Cr_2N.

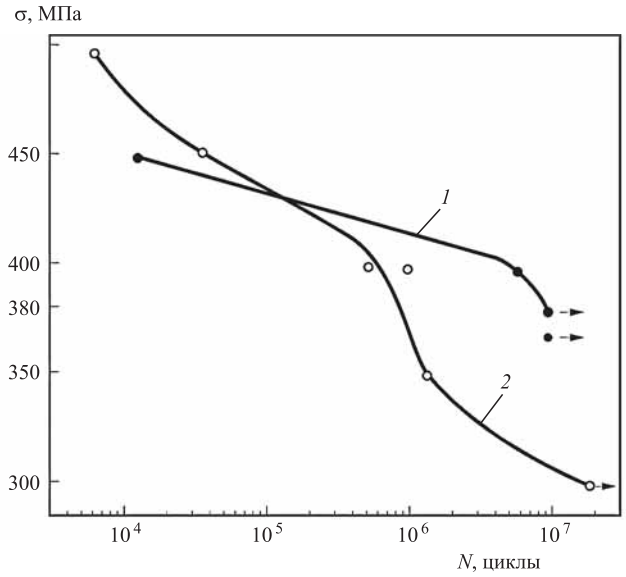


Рис. 1. Кривые усталости стали 05Х22АГ14Н7М при испытаниях на воздухе (*1*) и в морской воде (*2*)

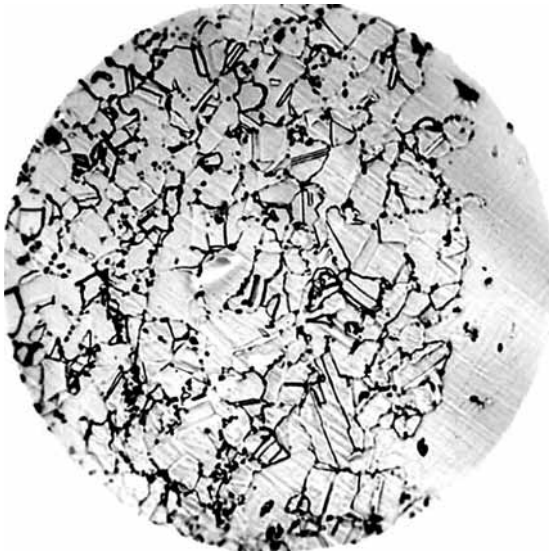


Рис. 2. Микроструктура стали 05Х22АГ14Н7М после закалки 1050 °С, вода. ×500

Электронная микроскопия выявила плоские скопления дислокаций, что свидетельствует о низкой энергии дефектов упаковки аустенита (см. рис. 3).

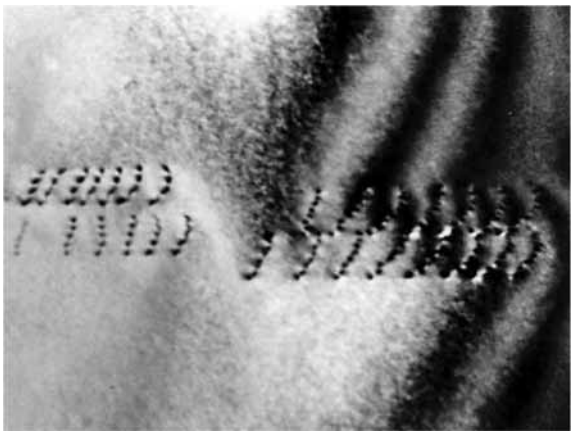


Рис. 3. Плоские скопления дислокаций с выделившимися на них частицами нитридов хрома в закаленной стали 05Х22АГ14Н7М. ×20 000

Выводы

1. Аустенитная коррозионно-стойкая сталь 05Х22АГ14Н7М характеризуется сочетанием высоких прочностных ($\sigma_{0,2}$ = 550...600 МПа; $\sigma_в$ = 950...1000 МПа) и пластических свойств (δ = 40...60 %; ψ = 50...70 %), что объясняется повышенным содержанием в составе стали азота (0,6...0,7 %).

2. Аустенит стали 05Х22АГ14Н7М имеет твердорастворный механизм упрочнения и высокий предел выносливости (на воздухе σ_{-1} = 380 МПа; в морской воде σ_{-1} = 300 МПа) на базе 10^7 циклов.

3. Сталь 05Х22АГ14Н7М может быть рекомендована для изготовления ответственных немагнитных (магнитная проницаемость $\mu < 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м) деталей судового машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Банных О.А., Блинов В.М.** Дисперсионно-твердеющие немагнитные ванадийсодержащие стали. М.: Наука, 1980. 190 с.

2. **А. с. 1225876.** Немагнитная сталь / О.А. Банных, В.М. Блинов, И.Л. Пойменов, О.И. Куликова, Ф.Р. Карелин, В.В. Глебов, Ю.Н. Каленихин, Ю.И. Комаров, Л.П. Орлов, В.Е. Пермитин, И.А. Шурыгина, Е.И. Мошкевич, С.С. Казаков. 1985.

3. **Высокопрочная** немагнитная сталь для тяжелонагруженных деталей транспортного машиностроения / В.В. Глебов, Н.М. Тюсина, Ю.Н. Каленихин, И.Л. Пойменов, В.М. Блинов, В.Е. Пермитин // Известия АН СССР. Сер. Металлы. 1989. № 1. С. 157.

4. **Блинов Е.В.** Разработка высокопрочного коррозионно-стойкого высокоазотистого немагнитного сплава для высоконагруженных деталей: дис.... канд. техн. наук. М.: ИМЕТ РАН, 2008. 156 с.

Владимир Васильевич Глебов, канд. физ.-мат. наук,
vladimir_vasg@rambler.ru;
Виктор Михайлович Блинов, д-р техн. наук

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ
СПРАВОЧНИК
Осинцев О.Е., Федоров В.Н.
2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.
Цена 1300 руб.

В справочнике впервые систематизированы и обобщены сведения о физических, механических и технологических свойствах почти всех марок меди и сплавов на ее основе: латуней, бронз, медно-никелевых сплавов, а также специальных медных сплавов: микролегированных, дисперсно-упрочненных, с эффектом памяти и др. Показано влияние легирующих элементов и примесей на свойства сплавов. Изложены сведения о составе и структуре, особенностях термической обработки, даны двойные и многокомпонентные диаграммы состояния, определяющие фазовый состав. Приведены также сведения о свойствах зарубежных аналогов отечественных медных сплавов. 2-е издание (1-е издание 2004 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами, а также дополнено сведениями по припоям на основе меди.

Для инженерно-технических работников машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений и университетов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

УДК 338.45:621

Б.Я. Татарских
(Самарский государственный экономический университет),
О.В. Федоров
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Проблемы и перспективы развития заготовительных производств в машиностроении

Изложены организационно-экономические и технологические проблемы реализации отраслевых и межотраслевых резервов ускорения развития заготовительных производств российского машиностроения. Приведены данные за последние 20—30 лет о структурных изменениях в системе заготовительных производств. Показаны возможные направления повышения эффективности заготовительных производств на основе использования достижений научно-технического прогресса.

Ключевые слова: машиностроение; заготовительные производства; факторы; структура; резервы; динамика; технологии; эффективность; тенденции; перспективы.

The organizational, economic and technological problems of the implementation of sectoral and interindustry reserves to accelerate of development of blanking productions in the Russian mechanical engineering are presented. Data for the last 20—30 years on structural changes in the blanking productions system are given. The possible directions of increasing of efficiency of blanking productions on the basis of using of scientific and technological progress achievements are shown.

Keywords: mechanical engineering; blanking productions; factors; structure; reserves; dynamics; technologies; efficiency; trends; prospects.

Дальнейшее развитие отечественного машиностроения во многом определяется потенциалом заготовительных производств.

Успешное развитие заготовительных производств создает предпосылки снижения общих материально-энергетических и трудовых затрат, положительно влияя на динамику себестоимости производимой продукции. Повышение ресурсоотдачи — важнейший фактор роста инвестиционной привлекательности машиностроительных предприятий, что во многом определяется уровнем технологий на заготовительных стадиях производства современных машин и оборудования.

В современных условиях в комплексе заготовительных производств сложной инженерно-экономической проблемой является проблема снижения влияния негативных факторов энерготехнологической многоукладности и это относится к "стыкам" переделов, начиная с литейных цехов.

За последние 25 лет в развитие материально-технической базы заготовительных производств вложено в 5—6 раз меньше инвестиций относительно механообрабатывающих цехов. Сложная производственно-технологическая ситуация складывается в системе "металлургия—машиностроение", в которой традиционно очень медленно решаются технико-экономические вопросы оптимизации заготовок. Не проводятся научные исследования тенденций структуры парка ведущего оборудования в заготовительных и обрабатывающих производствах, что снижает возможности управления технологическим уровнем в машиностроении. Потребности в основном технологическом оборудовании анализируются недостаточно глубоко и часто без при-

влечения ученых НИИ и ведущих технических вузов страны.

По данным отечественных и зарубежных ученых, в перспективе 20—30 лет основным конструкционным материалом останется металл. Его доля будет составлять в общей массе не менее 50 %. Однако под влиянием научно-технического прогресса за рассматриваемый период существенно изменится структура производственного металлопотребления в связи с появлением функциональных заменителей металла. Широкое применение получат прогрессивные заменители металлов, в числе которых следует выделить пластические массы, керамические и композиционные материалы.

В настоящее время продукция машиностроения России отличается от продукции передовых промышленно развитых стран (США, Япония, Германия) высоким уровнем металлоемкости. По многим видам машин и оборудования этот уровень выше в 2,8—3,5 раза.

Машиностроители при определении перспективной потребности в прогрессивных видах металлопродукции, как правило, приспосабливаются к нерационально сложившейся структуре металлообрабатывающего оборудования в отрасли, ориентируясь традиционно на обработку металлов резанием, при которой коэффициент использования проката черных металлов остается низким практически во всех подотраслях машиностроения и составляет около 0,72 при 0,87 в США (данные 2014 г.).

Важной качественной характеристикой развития технологии является структура обрабатываемого металла в машиностроении и металлообработке, которая отражает методы воздействия орудия на предмет труда (табл. 1).

Внедрение достижений научно-технического прогресса способствует появлению новых марок стали особой прочности в ряде отраслей машиностроения, однако часто возникают технические сложности в использовании существующего парка ведущего металлообрабатывающего оборудования, что обусловливается прежде всего несоответствием между стойкостью режущего инструмента, приспособлений и мощностью электродвигателей станков. Такое положение характерно и для кузнечно-прессового и кузнечно-штамповочного оборудования, где энергетический фактор играет еще бóльшую роль.

Развитие машиностроения страны предполагает непрерывное и значительное улучшение физических и механических свойств и расширения сортамента проката. Потребность машиностроения в фасонных профилях и профилях специального назначения удовлетворяется в среднем не более чем на 50...60 %. Поэтому на практике приходится использовать профили другой формы или другого размера с последующей обработкой резанием, что ведет к потерям металла.

Наиболее сложное положение создалось с листовой сталью и главным образом холоднокатаной. Вместо легких штампованных и сварных деталей приходится использовать отливки, что увеличивает массу деталей и стоимость их в 1,9—2,4 раза. И несмотря на преимущество листоштампованных и сварных конструкций по сравнению с отливками, доля применения последних в массовом машиностроении России значительно выше, чем в США. В ряде случаев использование отливок оправдано, когда они получены прогрессивными методами. Однако доля таких

1. Динамика структуры металлопотребления по годам, % к итогу [1—6]

Вид производства	1980	1990	2000	2010	2016 (оценка)
Всего обработано металла	100	100	100	100	100
В том числе:					
в литейном производстве	38...47	36...45	33...42	31...40	27...37
в кузнечно-штамповочном производстве	18...28	20...30	22...32	24...34	26...32
в механическом производстве	37...42	30...40	27...38	28...36	26...34

2. Динамика структуры заготовок в машиностроении по годам, % к итогу [1—6]

Наименование	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2010	2016 (оценка)
Сварные металлоконструкции	48,3	50,0	51,2	51,6	51,9	53,0	55,0	60,0
Штамповки (горячие)	8,0	8,2	8,0	7,9	7,9	7,5	7,0	6,0
Поковки из слитков	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,5	1,5	1,2
Отливки, всего	41,6	39,7	38,8	38,6	38,2	38,0	39,0	37,0
В том числе:								
чугунные	30,0	28,28	27,3	26,8	26,0	27,0	26,0	23,0
стальные	9,7	9,3	9,0	8,9	8,7	9,6	9,0	8,0
цветные	1,9	2,07	2,2	2,5	2,9	3,4	4,0	4,9

отливок в России составляет в среднем не более 30...35 %. В отечественном машиностроении за последние 40 лет медленно растет доля применяемых прогрессивных заготовок (табл. 2).

В числе проблем повышения эффективности заготовительных производств в машиностроении и металлообработке особое значение имеет материальное стимулирование экономии металла на всех уровнях производственной деятельности, начиная с рабочего места. При этом важно объективно оценить соответствующие параметры, по которым можно судить о динамике коэффициента использования металла по базовым технологическим переделам. За последние 30 лет динамика этого коэффициента очень незначительна и составляет в среднем около 0,72 (при 0,71 в 1985 г.). Коэффициент использования основных конструкционных материалов в отечественном машиностроении при изготовлении заготовок обработкой давлением за последние 35 лет несколько повысился (табл. 3).

В машиностроении России системно не ведется анализ зависимости между структурой металлопотребления и структурой основного металлообрабатывающего оборудования, что не позволяет оптимизировать материально-

3. Коэффициент использования материалов при изготовлении заготовок обработкой давлением в машиностроении по годам [1—6]

Заготовки	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Поковки:								
из проката кованные	0,74	0,79	0,81	0,82	0,82	0,83	0,84	0,84
из слитков кованные	0,65	0,65	0,66	0,67	0,68	0,68	0,69	0,70
горячештампованные	0,76	0,78	0,79	0,80	0,80	0,81	0,82	0,84
Заготовки:								
полученные холодной высадкой	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91	0,92	0,93	0,93
полученные холодным выдавливанием	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95
полученные листовой штамповкой	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79	0,79	0,81
прессованные из пластмасс	0,91	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,95
из пластмасс, отлитые под давлением	0,93	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98
полученные прессованием металлопорошков и твердых сплавов	0,90	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94

энергетические затраты, определяющие себестоимость производимых машин и оборудования. Для повышения эффективности особое внимание следует уделять организационно-техническим проблемам экономии металла за счет конкретных мероприятий на допроизводственной стадии современного машиностроительного производства с учетом постоянного роста цен на все виды металлопродукции, используемой в машиностроении.

Заготовительные производства большинства предприятий отечественного машиностроения значительно отстают от мирового уровня по масштабам производства точных заготовок примерно в 3—4 раза. В машиностроении выделяется недостаточно средств на развитие новых технологий в сфере производства прогрессивных материалов, что в итоге сказывается на качестве выпускаемой продукции. Снижение технологического уровня любого производства обусловливается прежде всего ухудшением параметров ведущего оборудования и главным образом за счет морального и физического старения, когда резко ухудшаются базовые технико-экономические характеристики оборудования (например, производительность, точность выполнения технологических операций, техническая надежность по критерию безотказной работы и т.д.). В машиностроении России за последние 35 лет отмечается тенденция старения парка ведущего технологического оборудования (табл. 4).

Медленно решаются научно-методические проблемы прогнозирования производства и использования в машиностроении новых прогрессивных конструкционных и инструментальных материалов, оказывающих важное значение для ускорения развития базовых технологий в основных переделах машиностроительного производства. Особое значение имеет "соединение" новых исходных конструкционных материалов и энергоносителей, обладающих высокими технико-экономическими характеристиками.

Значительный эффект может быть получен в заготовительных производствах машиностроения, где есть современное металлообрабатывающее оборудование (например, кузнечно-штамповочные агрегаты силой 300 МН и пресса силой более 100 МН). Как показывают данные, потенциал таких агрегатов в отечественном машиностроении используется недостаточно; их загрузка по времени составляет всего 10...15 %.

В числе главных факторов, которые привели к падению эффективности заготовительных технологий в машиностроительном комплексе в новых условиях хозяйствования следует выделить: несовершенство системы управления научно-технологическим прогрессом; разрушение единого организационно-экономического и научно-информацион-

4. Динамика структуры парка металлообрабатывающего оборудования машиностроения по годам (на конец года), % [1—6]

Оборудование	1981	1986	1991	1996	2001	2005	2011	2016 (оценка)
Металлорежущие станки, всего	100	100	100	100	100	100	100	100
В том числе после эксплуатации, лет:								
до 10	50,5	45,9	45,6	45,1	44,2	43,0	43,2	43,0
от 10 до 20	33,2	33,1	33,3	33,4	33,5	32,6	32,3	33,0
20 и более	16,3	21,0	21,1	21,5	22,3	24,4	24,5	24,0
Кузнечно-прессовые машины, всего	100	100	100	100	100	100	100	100
В том числе после эксплуатации, лет:								
до 10	51,8	50,0	50,5	50,6	50,1	49,6	48,9	48,0
от 10 до 20	30,6	39,7	29,5	29,5	29,6	29,9	30,3	30,0
20 и более	17,6	20,3	20,0	19,9	20,3	20,5	20,8	22,0

ного пространства на межотраслевом и межрегиональном уровнях; научно необоснованная приватизация, приведшая к деформации всей научно-технической сферы, включая ОКБ, НИИ; малоэффективная система привлечения иностранных инвестиций в сферу высоких технологий; отсутствие средств для опережающего развития приоритетных НИОКР (в том числе для развития потенциала технологий "двойного" назначения); критически высокий физический износ оборудования предприятий, производящих особо сложную и наукоемкую продукцию; отсутствие стратегии подготовки инженерных кадров для наукоемких отраслей машиностроения; низкий уровень инновационного менеджмента; невыполнение в срок большинства государственных программ по развитию базовых технологий; несовершенство механизма стимулирования внедрения прогрессивных технологий в заготовительных производствах.

В современных условиях необходимо глубокое исследование положительных и отрицательных факторов, определяющих результативность хозяйствования в системе межотраслевых функционально-технологических связей предприятий металлургии и машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Композит** — ЭКСПО 2017. Обзор // Машиностроитель. 2017. № 5. С. 52—53.
2. **Татарских Б.Я.** Организационно-экономические вопросы развития заготовительных производств в машиностроении // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 2. С. 3—8.
3. **Татарских Б.Я., Шмунк М.М.** Организационно-экономические резервы снижения металлоемкости продукции на предприятиях машиностроения. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2010. 93 с.
4. **Федоров О.В.** Аспекты ресурсообеспечения новых технологических укладов. М.: ИНФРА-М, 2017. С. 16—17.
5. **Татарских Б.Я.** Экономические вопросы использования в машиностроении достижений научно-технологического прогресса // Вестник экономики и менеджмента. 2016. Вып. 2. С. 74—76.
6. **Фальцман В.** Подвижки 2000-х гг. в отраслях и технологиях // Экономист. 2017. № 5. С. 17—19.

Борис Яковлевич Татарских, д-р экон. наук;
Олег Васильевич Федоров, д-р техн. наук,
fov52@mail.ru

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 03.10.2017. Подписано в печать 02.11.2017. 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.

Поздравляем

Виктора Евгеньевича Громова,

д-ра физ.-мат. наук, профессора

с 70-летием!

26 ноября 2017 г. исполнилось 70 лет члену редакционного совета нашего журнала Виктору Евгеньевичу Громову — известному в России и за рубежом металлофизику, заслуженному деятелю науки РФ, почетному металлургу РФ, члену Межгосударственного совета по физике прочности и пластичности материалов, Научного совета РАН по физике конденсированных сред, доктору физико-математических наук, профессору, заведующему кафедрой естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета. В.Е. Громов зарегистрирован в Федеральном реестре экспертов в научно-технической сфере Министерства образования и науки и РАН, он — член редакционных коллегий четырех журналов, входящих в список ВАК.

Как высококвалифицированный специалист широкого профиля Виктор Евгеньевич по праву занимает ведущее место среди ученых России в области материаловедения, физики прочности и пластичности сталей и сплавов. На протяжении долгой научной деятельности его учителями и соратниками являются известные российские ученые-металлофизики и материаловеды: В.Е. Панин, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, А.М. Глезер, Ю.Ф. Иванов.

Экспериментальные и теоретические исследования в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий (электрических полей и токов, плазменных и электронных пучков), выполненные за 40 лет В.Е. Громовым и его учениками, получили широкую известность и признание в научных кругах и привели к созданию нового научного направления. Результаты исследований нашли применение как в академических, отраслевых и учебных институтах при изучении природы формоизменения металлов и сплавов, так и на ряде предприятий металлургической промышленности и машиностроения при разработке соответствующих электротехнологий. Они внедрены со значительным экономическим эффектом на предприятиях Кузбасса.

За цикл работ по внедрению безкислотной технологии удаления окалины при производстве проволоки из малоуглеродистых и низколегированных сталей на предприятиях металлургической отрасли В.Е. Громов удостоен премии Правительства РФ в области науки и техники. В 2013 г. он становится лауреатом премии РАН имени академика И.П. Бардина. В последние годы научная школа "Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий", возглавляемая В.Е. Громовым, плодотворно работает в области наноструктурного материаловедения по грантам РФФИ, РНФ и целевым программам Министерства образования и науки.

За период работы в высшей школе Виктор Евгеньевич проявил качества талантливого педагога и организатора высшего образования. В.Е. Громов — "Лучший профессор Кузбасса 2003", "Почетный профессор Кузбасса 2015" и один из ведущих профессоров университета, пользуется заслуженным уважением студентов и коллег. Его лекции отличает сочетание высокого теоретического уровня с ясной формой изложения.

Виктор Евгеньевич воспитал плеяду талантливых научных сотрудников — 8 докторов и свыше 35 кандидатов наук, плодотворно работающих в высшей школе, на производстве, в бизнесе. Он автор более 3300 научных публикаций, в том числе 25 патентов и 70 монографий.

В.Е. Громов — действительный член Международной академии энергоинформационных наук и Российской академии естественных наук. Его заслуги отмечены медалями "За служение Кузбассу", "За особый вклад в развитие Кузбасса" II и III степени, другими наградами и грамотами администрации Кемеровской области.

Коллектив редакции, редакционный совет нашего журнала, ученики и друзья
сердечно поздравляют Виктора Евгеньевича с юбилеем
и желают ему доброго здоровья, благополучия
и новых научных свершений и достижений!