ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 12 декабрь 2015

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И., д.т.н., проф.

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:
БЕЛЯКОВ А.И., к.т.н.
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.
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., 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.
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.
СУБИЧ В.Н., 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.
ШЕСТАКОВ Н.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯКОВЛЕВ С.С., д.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ТУТМАН Т., Dr.Yur.
ЭРКСЛЕБЕН С., Dr.-Ing.

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Факс: (499) 269 48 97
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Гущин Н.С., Куликов В.И., Нуралиев Ф.А., Беляков А.И. Разработка импортозамещающей технологии изготовления мелющих элементов углеразмольной мельницы МПС-2650 3
Малушин Н.Н., Гизатулин Р.А., Ковалев А.П., Смагин Д.А., Осетковский И.В. Влияние термического цикла наплавки с низкотемпературным подогревом на свойства наплавленного хромовольфрамового металла высокой твердости 8

Кузнечно-штамповочное производство

Мамаев В.Б., Мамаев М.В. Моделирование влияния технологических факторов на протекание и результаты процессов осадки на основании метода траекторий главных нормальных направлений 13
Мармонье Л. Высокоэффективные смазочные технологии и материалы для холодной объемной штамповки компании CONDAT. 20
Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Сосенушкин А.Е. Показатели эффективности процесса равноканального углового прессования 23

Прокатно-волочильное производство

Филиппова М.В., Климов А.В., Перетятько В.Н. Качество мелющих шаров 30

Материаловедение и новые материалы

Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А. Разработка универсальной методики гранулометрического анализа металлических и неметаллических порошковых материалов и изделий из них, тонкой структуры зерен и процессов их агломерации 36

Информация

Лавриненко В.Ю. XII Международная научно-техническая конференция "Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем" в Севастополе. 44
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2015 г. 45

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

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

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2015

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

№ 12 December 2015

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
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.
LAVRINENKO V.Yu.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATUL'SKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
TUTMANN T.
ERXLEBEN S.

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Fax: (499) 269-48-97
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Gushchin N.S., Kulikov V.I., Nuraliev F.A., Belyakov A.I. Development of import-substituting manufacturing technology of grinding elements of coal mill MPS-2650 3
Malushin N.N., Gizatulin R.A., Kovalev A.P., Smagin D.A., Osetkovsky I.V. Effect of thermal cycle of welding with low-temperature heating on properties of weld chrome-tungsten high hardness metal 8

Forging and Stamping Production

Mamaev V.B., Mamaev M.V. Simulation of effect of technological factors on course and results of upsetting processes on basis of principal normal directions trajectories method 13
Marmonier L. High effective lubrication technologies and materials for cold forging of CONDAT company 20
Sosenushkin E.N., Ovechkin L.M., Sosenushkin A.E. Efficiency parameters of equal channel angular extrusion process. 23

Rolling and Drawing Production

Filippova M.V., Klimov A.V., Peretyat'ko V.N. Quality of grinding balls. 30

Physical Metallurgy and New Materials

Petrov A.N., Loginov B.A., Petrov M.A. Development of universal granulometric analysis method purposed for metallic and non-metallic powders and parts made from it, especially for investigation of fine-grain structure and coarse grains' agglomeration 36

Information

Lavrinenko V.Yu. XII International scientific and technical conference "Dynamics, reliability and durability of mechanical and biomechanical systems" in Sevastopol 44
Index of articles published in year 2015. 45

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

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

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2015

УДК 621.74.0026

Н.С. Гущин, В.И. Куликов, Ф.А. Нуралиев *(АО "НПО "ЦНИИТМАШ", г. Москва),*
А.И. Беляков *(ООО "МеталЛитМаш", г. Коломна)*

Разработка импортозамещающей технологии изготовления мелющих элементов углеразмольной мельницы МПС-2650

Экспериментально определены влияние формы графита и содержания кремния на уровень остаточных напряжений в износостойких отливках бандажей массой 6 т из чугуна типа "Нихард-4", а также значения физико-механических, технологических и эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: чугун типа "Нихард-4"; пластинчатый и шаровидный графит; тензометрирование; остаточные напряжения; карбиды; аустенит; мартенсит; кремний.

The influence of the form of graphite and silicon content on the level of residual stresses in the wear-resistant castings of bandages weight 6 t from cast iron type "Nihard-4", and also the values of physical and mechanical, technological and operational characteristics are experimentally defined.

Keywords: cast iron type "Nihard-4"; flake and spheroidal graphite; strain measurement; residual stresses; carbides; austenite; martensite; silicon.

Разработка, промышленное производство и применение конструкционных чугунов с высокими параметрами специальных свойств, в частности износостойкости, необходимы для увеличения выпуска электроэнергии в результате значительного наращивания мощности энергоблоков тепловых электростанций, работающих на угле.

Для этой цели АО "ТЯЖМАШ" (г. Сызрань) освоена в производстве углеразмольная среднеходная мельница МПС-2650 по лицензии фирмы Deutsche Babcok. Масса размольных элементов мельницы производительностью 90 т/ч угольной пыли составила для сегмента и бандажа 0,8 и 6 т соответственно. Немецкая фирма изготовляет их из белого хромоникелевого чугуна "Нихард-4", разработанного фирмой International Nickel Company (США) и получившего широкое применение за рубежом.

Однако этот чугун нетехнологичен и требует строгого соблюдения сложного технологического процесса производства массивных бандажей углеразмольного оборудования. При изготовлении бандажей необходимо применение чистых шихтовых материалов, а для форм — специальный хромитовый песок. Повышенная склонность чугуна "Нихард-4" к образованию трещин требует медленного охлаждения отливок в форме, что существенно удлиняет цикл их изготовления.

В связи с этим перед специалистами ЦНИИТМАШа была поставлена задача: разработать новый высокоизносостойкий сплав с улучшенными технологическими характеристиками. В результате комплекса работ разработан новый половинчатый хромоникелевый чугун ЧХ8Н4Ш (пат. № 1299155), структура которого в основном мартенситно-карбидная с небольшим содержанием включений шаровидного графита.

Такое гетерогенное строение структуры, получаемое по разработанной технологии с соответствующим модифицированием, обеспечивает высокую износостойкость и хорошие механические свойства деталей. Изделия из чугуна ЧХ8Н4Ш в литом состоянии (без термической обработки) имеют твердость 59...63 HRC, соответствующую ТУ для деталей углеразмольного оборудования.

На основании экспериментальных данных, можно гарантировать изготовление крупнотоннажных отливок из чугуна ЧХ8Н4Ш, обладающего в литом состоянии благоприятным сочетанием специальных свойств, с низким уровнем остаточных напряжений и, соответственно, без трещин.

Измеряли линейную усадку ε, коэффициент линейного расширения α при 20...100 °С, теплопроводность λ, модуль упругости *E*, предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ чугунов "Нихард-4" и ЧХ8Н4Ш. В табл. 1 приведены свойства исследованных чугунов в литом состоянии.

Для определения напряженного состояния бандажей из чугуна "Нихард-4" тензометрировали реальные отливки массой 6 т, отлитые в разовые сухие песчаные формы. Чугун массой 8 т выплавляли в дуговой печи ДСП-5М. Физико-механические свойства и усадка износостойкого чугуна, из которого отлиты бандажи, приведены в табл. 2.

Остаточные напряжения измеряли методом вырезки участка исследуемой отливки, на которую предварительно наклеивали циакриновым клеем тензодатчики типа 2ФКПА-10-100 ГВ (рис. 1). Схема расположения тензодатчиков показана на рис. 2. Деформацию тензодатчиков на вырезанной части фиксировали прибором ЦТМ-5.

Разрезали бандажи с помощью воздушно-дуговой резки.

Результаты тензометрирования приведены в табл. 3.

Результаты исследования показали, что разрезка бандажа-1 по варианту *1-1* не обеспечивает полного снятия остаточных напряжений в отливке; при дополнительной разрезке по схеме *2-2* уровень остаточных напряжений в 1,5—2 раза выше. При этом сечение А-А вследствие наличия концентраторов в виде пазов и отверстий характеризуется вдвое большими напряжениями, чем сечение В-В.

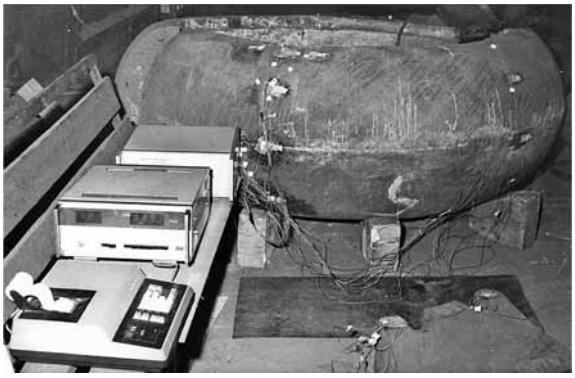


Рис. 1. Тензометрирование отливки бандажа мельницы МПС-2650 в ООО "Белэнергомаш—БЗЭМ"

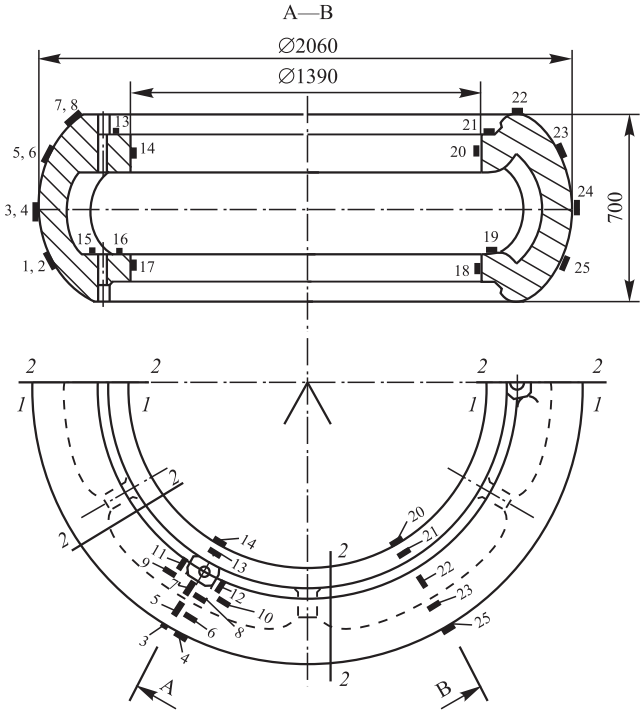


Рис. 2. Схемы расположения тензодатчиков на отливке бандажа и ее разрезки при тензометрировании

Распределение остаточных напряжений по разным участкам сечения также неравномерно. Растягивающие остаточные напряжения наблюдаются, как правило, на наружной поверхности,

1. Свойства чугунов в литом состоянии

Марка чугуна	ε, %	α, 10^{-6} 1/°С	λ, Вт/(м·К)	*E*, ГПа	$\sigma_{изг}$, МПа	Микроструктура
Нихард-4	2,6	14,7	15	195	450	А + $К_1$ + $К_2$
ЧХ8Н4Ш	1,7	10,2	33	175	900	М + $К_2$ + $А_{ост}$ + ШГф5

Обозначения: А — аустенит; $А_{ост}$ — остаточный аустенит; М — мартенсит; ШГф5 — шаровидный графит; $К_1$ — карбид цементитного типа; $К_2$ — карбид тригонального типа.

2. Физико-механические свойства и усадка износостойкого чугуна

Чугун	Литое состояние				Нормализованное состояние				Линейная усадка, %	
	HRC	$\sigma_{изг}$, МПа	$И_1$	$И_2$	HRC	$\sigma_{изг}$, МПа	$И_1$	$И_2$	Расширение	общая
Нихард-4	50	450	—	—	62	650	1,0	1,0	—	2,4
Нихард-4 с ПГ	55	250	—	0,70	55	300	—	—	0,10	1,5
Нихард-4 с ШГ	61	800	1,21	1,07	61	850	—	—	0,45	1,6

Обозначения: $И_1$, $И_2$ — износостойкость в условиях абразивного (на машине ХЧБ) и гидроабразивного изнашивания соответственно; ПГ и ШГ — пластинчатый и шаровидный графит.

3. Остаточные напряжения, МПа, в отливках бандажей в литом состоянии

Номер термодатчика (см. рис. 2)	σ_R	τ	σ_Z	σ_R	τ	σ_Z	σ_R	τ	σ_Z
	Вариант разрезки 2-2			Вариант разрезки 1-1					
	Бандаж-1 из белого чугуна "Нихард-4"			Бандаж-1 из белого чугуна "Нихард-4"			Бандаж-2 из чугуна "Нихард-4" с шаровидным графитом		
1	—	—	+159	—	—	+129	—	—	—
2	—	+154	—	—	+129	—	—	+64	—
3	—	—	+140	—	—	+116	—	—	—
4	—	+180	—	—	+157	+144	—	+23	—
5	—	—	+175	—	—	—	—	—	—
6	—	+204	—	—	+172	—	—	+69	—
7	+192	—	—	+177	—	—	+53	—	—
8	—	+178	—	—	+145	—	—	+74	—
9	—	+283	—	—	+130	—	—	+18	—
10	—	+321	—	—	+128	—	—	+8	—
11	+97	—	+32	—	—	—	+7	—	—
12	+9	—	—	+47	—	—	+46	—	—
13	—	−288	—	—	−188	—	—	0	—
14	—	−340	—	—	−166	—	—	−1,8	—
15	—	−215	—	—	−125	—	—	−19	—
16	—	−210	—	—	−162	—	—	−1,8	—
17	—	−296	—	—	−165	—	—	0	—
18	—	−109	—	—	−67	—	—	−2,6	—
19	—	−134	—	—	−57	—	—	−2,1	—
20	—	−113	—	—	−55	—	—	−3,5	—
21	—	−143	—	—	−56	—	—	−4	—
22	+103	—	—	+45	—	—	+48	—	—
23	—	+74	—	—	+41	—	—	+5	—
24	—	+58	—	—	+32	—	—	+6	—
25	—	+68	—	—	+36	—	—	+13	—

Примечания: 1. Тензодатчики № 1—17 — в сечении А—А, № 18—25 — в сечении В—В.
2. Знак "+" — напряжения растяжения; "–" — напряжения сжатия.

Рис. 3. Излом отливки бандажа из белого чугуна типа "Нихард-4", тензометрированной по варианту *1-1* (надрез 15 % в верхней части сечения отливки)

а сжимающие — на посадочной поверхности внутренних фланцев. Сжимающие остаточные напряжения в сечениях А-А и В-В (т. 13—18, 21) значительно больше растягивающих остаточных напряжений, хотя вблизи углов паза растягивающие напряжения (т. 9—10) максимальны. Именно в этих местах появлялись трещины при изготовлении первой отливки.

Уровень остаточных напряжений на наружной поверхности отливки возрастает по высоте бандажа и максимален в его верхней части, затвердевающей в последнюю очередь (т. 9, 10, 22, 23).

Вследствие высокого уровня растягивающих напряжений достаточно было сделать сверху надрез бандажа-1 примерно на 15 % сечения, чтобы он самопроизвольно разрушился (рис. 3). Это позволило устранить влияние ребер жесткости отливки на деформацию ее освобожденной части и получить более достоверную картину характера и величины остаточных напряжений.

Рис. 4. Излом отливки бандажа из чугуна "Нихард-4" с шаровидным графитом, тензометрированной по варианту *1-1* (надрез 85 % в верхней части сечения отливки)

Выделение структурно-свободного углерода в виде шаровидного графита в металлической основе чугуна типа "Нихард-4" способствует снижению остаточных напряжений настолько, что для самопроизвольного разрушения бандажа приходится надрезать 85 % сечения (рис. 4). Прилегающие к месту разрезки участки отливки разогреваются, выводя из строя тензодатчики, поэтому бандажи из чугуна "Нихард-4" с шаровидным графитом разрезали только по варианту *1-1*.

Выделение пластинчатого графита приводит к сильному снижению прочности, износостойкости и охрупчиванию, эти свойства возрастают также и в случае выделения шаровидного графита (см. табл. 2).

Особенностями чугуна типа "Нихард" с шаровидным графитом являются, во-первых, возможность получения необходимых эксплуатационных свойств отливок в литом состоянии, т.е. без применения термической обработки, и, во-вторых, высокие предусадочное и мартенситное расширения (рис. 5), снижающие общую линейную усадку на 45 % по сравнению с прототипом.

На рис. 6, *а* представлена микроструктура белого чугуна типа "Нихард-4", состоящая из аустенита и карбидов цементитного и тригонального типов, в процессе нормализации (выдержка 8 ч при температуре 810 °С с последующим охлаждением на воздухе) аустенит превращается в мартенсит (рис. 6, *б*).

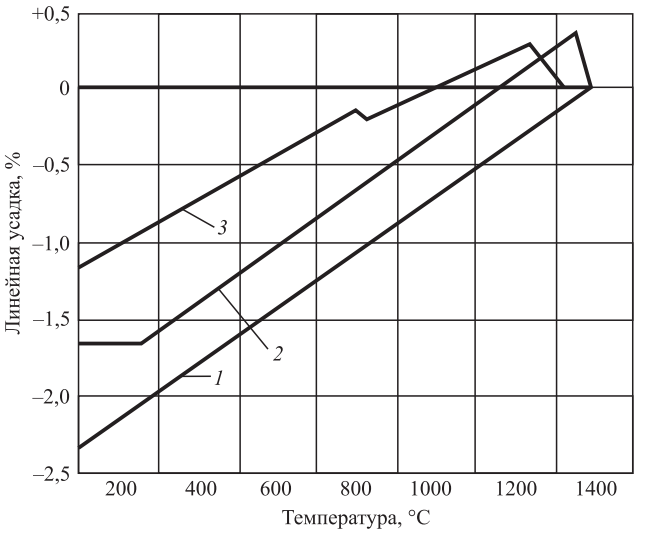


Рис. 5. Влияние содержания и формы графита на линейную усадку и предусадочное и мартенситное расширение чугуна типа "Нихард-4" (*1*), "Нихард-4" с шаровидным графитом (*2*) и пластинчатым графитом (*3*)

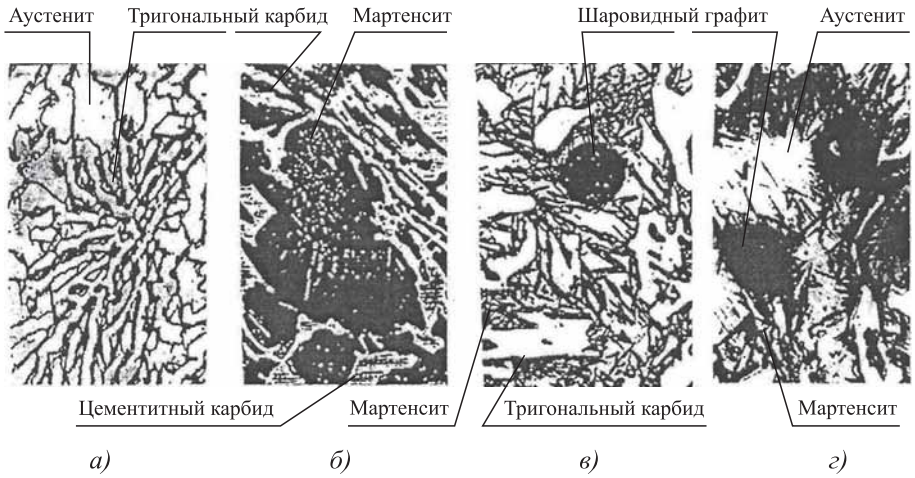


Рис. 6. Микроструктура чугуна типа "Нихард-4" (×500):

а — литое состояние; *б* — термообработанное состояние; *в*, *г* — "Нихард-4" с шаровидным графитом

На рис. 6 *в*, *г*, приведены микроструктуры металлической основы чугуна типа "Нихард-4" с шаровидным графитом в литом состоянии с различным содержанием остаточного аустенита.

Разработанный чугун типа "Нихард-4" (пат. № 2234553) с шаровидным графитом, применяемый для отливок бандажей углеразмольных мельниц МПС-2650 массой 6 т вместо белого чугуна "Нихард-4", имеет следующие технико-экономические преимущества:

- сокращается продолжительность выплавки расплава на 2,5...3 ч;
- сокращается продолжительность выдержки отливок в форме с 20 до 4 сут;
- отпадает необходимость проведения высокотемпературной термической обработки;
- снижается брак литья по трещинам на 80 %.

Исследования показали, что с увеличением содержания кремния в хромоникелевом чугуне происходит повышение его содержания в аустените при одновременном снижении углерода.

Выделение части структурно-свободного углерода в виде графита способствует объединению аустенита углеродом, что приводит к получению мартенситной металлической основы в литом состоянии.

Кроме того, при выделении углерода в свободном виде снижается количество связанного углерода. Благодаря этому соотношение концентрации хрома и углерода находится в интервале 3...10. При таком соотношении хрома и углерода образуются карбиды тригонального типа $(Cr, Fe)_7C_3$, которые в сравнении с карбидами цементитного типа $(Fe, Cr)_3C$ в меньшей степени ухудшают технологические свойства легированных чугунов и в то же время их микротвердость больше микротвердости последних в 1,5 раза.

Реализация в производственных условиях сталелитейного цеха ООО "Белэнергомаш—БЗЭМ" технологических рекомендаций подтвердила высокую сходимость эксплуатационных характеристик с результатами исследований.

Эксплуатационную проверку работоспособности новой мельницы проводили на Чайковской ТЭЦ и Экибастуской ТЭЦ (Казахстан). Результаты эксплуатации подтвердили высокую надежность и работоспособность износостойких деталей, изготовленных из чугуна типа ЧХ8Н4Ш.

Таким образом, для существенного улучшения технологических и эксплуатационных свойств износостойких хромоникелевых чугунов и снижения энергоемкости производства отливок необходимо иметь в структуре этих чугунов определенное количество структурно-свободного углерода в виде шаровидного графита.

Количество включений шаровидного графита в структуре хромоникелевых чугунов зависит от содержания кремния и хрома и скорости охлаждения отливки. Наличие определенного количества шаровидного графита в структуре хромоникелевых чугунов снижает концентрацию углерода в аустените и его устойчивость, что позволяет получать мартенситно-карбидную структуру и требуемые эксплуатационные свойства износостойких отливок с различной толщиной стенок в литом состоянии без высокотемпературной термической обработки. Количество карбидной фазы повышается с увеличением содержания хрома, а при изменении соотношения хрома и углерода создаются благоприятные условия для выделения наиболее твердых карбидов тригонального типа.

Изменяя содержание углерода, кремния и хрома, можно обеспечить получение заданной структуры и свойств хромоникелевых чугунов с шаровидным графитом в отливках с различной толщиной стенок.

Николай Сафонович Гущин, канд. техн. наук;
Василий Иванович Куликов, канд. техн. наук;
Фейзулла Алибала оглы Нуралиев, канд. техн. наук,
litotdel12@yandex.ru;
Алексей Иванович Беляков, канд. техн. наук

УДК 621.791.92

Н.Н. Малушин, Р.А. Гизатулин*, А.П. Ковалев, Д.А. Смагин, И.В. Осетковский**
(ОАО "ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат", г. Новокузнецк,
**Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,*
***Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)*

Влияние термического цикла наплавки с низкотемпературным подогревом на свойства наплавленного хромовольфрамового металла высокой твердости

Исследовано влияние термического цикла наплавки с низкотемпературным подогревом на свойства, структуру и фазовый состав хромовольфрамового быстрорежущего металла типа сталей Р18 и Р6М5. Показано, что предложенный цикл наплавки обеспечивает получение наплавленного металла в состоянии, близком к закаленному, без образования трещин и с высокой твердостью.

Ключевые слова: наплавка; хромовольфрамовый наплавленный металл; регулируемый термический цикл наплавки; структура; фазовый состав.

The influence of thermal cycle of surfacing with low-temperature heating on the properties, structure and phase composition of high-speed chrome-tungsten metal type steels R18 and R6M5. It is shown that the proposed cycle of surfacing provides reception of weld metal in state close to tempered without cracking and with high hardness.

Keywords: surfacing; chrome-tungsten weld metal; adjustable thermal welding cycle; structure; phase composition.

Требованиям, предъявляемым к наплавленному металлу для упрочнения деталей горно-металлургического оборудования, наиболее полно соответствуют хромовольфрамовые теплостойкие стали. Теплостойкие стали типа Р18, Р6М5, Р9, Р2М8, 3Х2В8. обладают наряду с высокими служебными свойствами неудовлетворительной свариваемостью.

Обычно для предотвращения образования холодных трещин традиционная технология наплавки предусматривает обязательное применение высокотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева ($T_{под}$ = 400...700 °С) и замедленного охлаждения изделия. При этом происходит образование пластичных продуктов распада аустенита, обладающих низкой твердостью и износостойкостью, что вызывает необходимость в проведении сложной термической обработки (отжиг + закалка + отпуск). В процессе термической обработки биметаллического изделия не всегда удается полностью использовать свойства высоколегированного металла и обеспечить его максимальную твердость.

В разработанных в Сибирском государственном индустриальном университете способах наплавки теплостойких сталей высокой твердости для предотвращения образования холодных трещин предложено использовать эффект кинетической пластичности ("сверхпластичности").

Особенностью предложенных способов наплавки является применение низкотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева ($T_{под}$ = 230...280 °С). Для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин регулируется уровень временных напряжений в процессе наплавки путем их частичной релаксации за счет проявления эффекта кинетической пластичности в момент протекания мартенситного или бейнитного превращений.

Особенность предлагаемого термического цикла наплавки заключается в трех его стадиях [1]. Первая стадия обеспечивает ограниченное время нагрева и повышенную скорость охлаждения в области высоких температур, предотвращает рост зерна и распад аустени-

та с образованием равновесных низкопрочных структур. Она может быть реализована применением высококонцентрированных источников нагрева (например, сжатой дугой) и сопутствующего охлаждения.

Вторая стадия термического цикла обеспечивает нахождение наплавленного металла в аустенитном состоянии при выполнении всех слоев в процессе наплавки. Это достигается применением подогрева с $T_{под} = M_н + (50...100\ °C)$.

На третьей стадии термического цикла для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин регулируется уровень временных напряжений в процессе наплавки путем временного снижения $T_{под}$ ниже температуры $M_н$. При этом временные напряжения снижаются в результате частичной релаксации в момент протекания мартенситного или бейнитного превращений.

Рекомендуемый термический цикл для плазменной наплавки деталей горно-металлургического оборудования изображен на рис. 1 [1—3]. Такой термический цикл позволяет получить наплавленный металл в закаленном состоянии с низким уровнем остаточных напряжений и обеспечивает высокую твердость наплавленного металла при относительно несложной технологии наплавки.

Целью работы является исследование влияния термического цикла наплавки с низкотемпературным подогревом на свойства, структуру и фазовый состав хромовольфрамового быстрорежущего металла.

Исследовали влияние термической обработки на твердость и фазовый состав наплавленных быстрорежущих сталей типа Р18 и Р6М5, химический состав которых приведен в табл. 1. В качестве основного металла выбрана

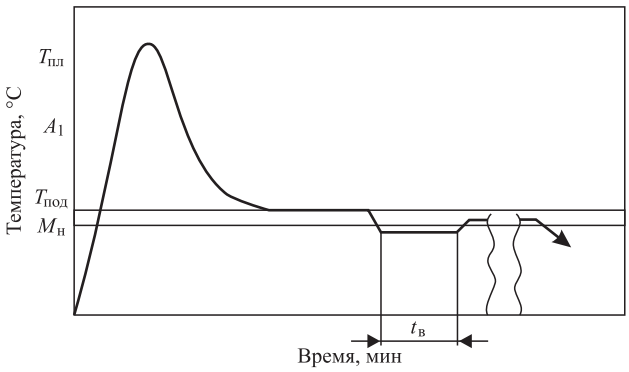


Рис. 1. Схема термического цикла при плазменной наплавке

1. Химический состав наплавленных быстрорежущих сталей типа Р18 и Р6М5, % мас.

Сталь	C	Cr	W	Mo	V	Al	N
Р18	0,86	4,84	17,00	5,40	0,50	0,65	0,06
Р6М5	0,64	3,22	4,40	5,40	0,50	0,70	0,05

сталь 30ХГСА, обладающая высоким комплексом механических свойств.

Наплавку заготовки осуществляли на установке для плазменной наплавки тел вращения [1]. Валки наплавляли плазменной дугой с подачей в сварочную ванну нетоковедущей присадочной порошковой проволоки ПП-Р18Ю и ПП-Р6М5. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, в качестве защитного газа — азот.

Плазменную наплавку проводили по термическому циклу, представленному на рис. 2. Заготовку с припусками под наплавку 10...12 мм на сторону устанавливали в центрах наплавочной установки, предварительно подогревали до температуры 230 °С, включали охлаждение шеек валка с расходом холодной воды до 2 л/мин.

После завершения подготовительных операций осуществляли 5—6-слойную наплавку. Режим наплавки рабочих валков диаметром 100 мм и длиной бочки 315 мм: сварочный ток 150...160 А; напряжение дуги 50...55 В; скорость наплавки 18 м/ч; скорость подачи порошковой проволоки 60 м/ч; смещение с зенита 10...12 мм; длина дуги 20 мм; расход защитного газа азота 20...22 л/мин; расход плазмообразующего газа

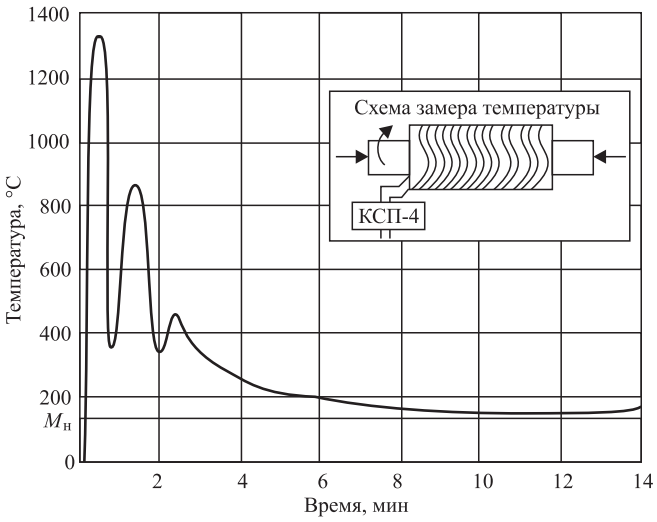


Рис. 2. Термический цикл при наплавке первого слоя валка диаметром 100 мм

аргона 6...8 л/мин; диаметр проволоки 3,7 мм. Продолжительность наплавки 3 ч, после окончания наплавки валок охлаждался на воздухе.

Дефекты наплавки при визуальном осмотре валков не обнаружены. Качество наплавленной поверхности удовлетворительное. Твердость наплавленного металла после наплавки составляет 54...58 HRC. Для увеличения твердости и износостойкости проводили 4-кратный отпуск при 580 °С, 1 ч. Твердость наплавленных валков после высокотемпературного отпуска соответствует требованиям, предъявляемым к поверхностному слою рабочих валков холодной прокатки. После отпуска осуществляли окончательную механическую обработку.

Из верхних слоев наплавленного металла вырезали образцы размерами 70×10×5 мм на станке электроискровой резки для каждой марки стали. Половину образцов от партии подвергали термической обработке, режимы которой в случае наплавленных образцов выбирали из рекомендаций для близких по составу кованых сталей Р18 и Р6М5 (табл. 2).

Состояние металла после наплавки, а также после наплавки и термической обработки (отжиг + закалка) оценивали по результатам рентгеноструктурного и физико-химического фазового анализов. Физико-химический анализ проводят для изучения распределения карбидообразующих элементов между твердым раствором и карбонитридной фазой.

Предварительно образцы подвергали анодному растворению с поверхности для устранения измененного слоя после электроискровой резки и шлифования. Физико-химическое изолирование карбонитридной фазы осуществляли в 15%-ном водном растворе поваренной

2. Твердость наплавленных образцов из сталей Р18 и Р6М5

Сталь	Термическая обработка	Твердость, HRC
Р18	Без термической обработки	52...54
	Отжиг + закалка от 1260 °С в масле	59...60
Р6М5	Без термической обработки	55...57
	Отжиг + закалка от 1220 °С в масле	62...63

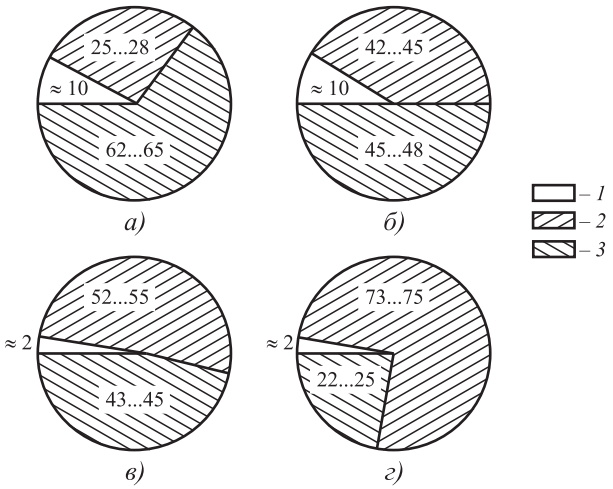


Рис. 3. Фазовый состав, %, наплавленных быстрорежущих сталей типа Р18 (*а*, *б*) и Р6М5 (*в*, *г*):

а, *в* — термически необработанные; *б*, *г* — после отжига и закалки; *1* — карбонитрид $M_6(CN)$; *2* — мартенсит; *3* — остаточный аустенит

соли и 2,5 % винной кислоты. Плотность тока 0,03...0,06 А/см^2; время электролиза 30...40 мин. Содержание карбидообразующих элементов в карбонитридной фазе определяли по отношению к навеске растворенного металла [4].

Фазовый состав наплавленных быстрорежущих сталей типа Р18 и Р6М5 приведен на рис. 3.

В быстрорежущих сталях возможно образование карбидов типа M_6C, $M_{23}C_6$, M_2C, MC, а в сталях с азотом — также нитридов и карбонитридов [4]. Рентгеноструктурный анализ показал, что основной составляющей анодного осадка является фаза, изоморфная карбиду M_6C. В анодном осадке присутствуют также в малом количестве карбиды $M_{23}C_6$ и следы M_2C. Содержание $M_{23}C_6$ в наплавленных термически необработанных сталях несколько больше, чем в закаленных.

Фазы, изоморфной карбиду VC, в анодном осадке не обнаружено. При пониженном содержании (не более 1 %) ванадий в быстрорежущих сталях не образует заметного количества самостоятельного карбида и присутствует в карбидах M_6C и $M_{23}C_6$. В работе [4] установлено, что при содержании не более 1 % V в быстрорежущих сталях с азотом образуется карбонитридная фаза $M_6(CN)$, изоморфная карбиду M_6C.

Съемку со шлифов проводили на установке ДРОН-2,0. Использовали λ—FeK_α-излучение.

Образцы перед съемкой шлифовали и подвергали полированию в электролите, содержащем 1000 мл ледяной уксусной кислоты и 50 мл хлорной кислоты (плотность 1,6 г/мл), при плотности тока 0,4...0,8 А/см^2 и напряжении 40...60 В. Продолжительность электролиза 25...30 с. Параметры кристаллических решеток рассчитывали по положению пиков (110) для мартенсита, (111) для аустенита, (511) для карбонитрида $M_6(CN)$. Количество структурных составляющих определяли по интенсивности аналитических пиков.

Пониженную твердость наплавленной стали Р18 после закалки можно объяснить системой легирования. Более высокое по сравнению с кованными сталями содержание углерода, а также хрома, наличие азота, пониженное содержание ванадия увеличивают количество остаточного аустенита в закаленной наплавленной стали (см. рис. 3, *б*).

Твердость наплавленной стали Р6М5 близка к твердости закаленной кованой. Содержание углерода и хрома в наплавленной стали типа Р6М5 ниже, чем в Р18, что приводит к уменьшению количества остаточного аустенита (см. рис. 3, *г*). Твердость наплавленных сталей Р18 и Р6М5, не подвергавшихся термической обработке, меньше на 6...8 HRC, а содержание остаточного аустенита больше примерно на 20 %, чем у термически обработанных (см. рис. 3).

По-видимому, замедленное охлаждение наплавленного металла в интервале температур бейнитного превращения приводит к стабилизации аустенита. Характерно, что в сталях той и другой марки, не подвергавшихся термической обработке, параметр решетки γ-фазы больше, а параметр решетки α-фазы меньше, чем у закаленных. Это свидетельствует о различной степени легированности γ- и α-фазы в сталях, термически необработанных и закаленных.

Косвенно о распределении основных легирующих элементов между ($\alpha + \gamma$)-твердым раствором и карбонитридной фазой можно судить по изменению параметра решетки карбонитрида $M_6(CN)$. Параметр решетки карбонитрида в сталях, не подвергавшихся термической обработке, меньше, чем в закаленных, что свидетельствует о большом содержании вольфрама (молибдена) в карбонитриде закаленных сталей. Как видно из результатов физико-химического анализа, карбонитридная фаза закаленных сталей содержит большее количество вольфрама (молибдена), чем сталей, не прошедших термическую обработку. Соответственно, содержание хрома и железа в карбонитридной фазе этих сталей после закалки несколько уменьшилось.

Различие содержания элементов в карбонитридной фазе термически необработанных сталей, подвергнутых отжигу и закалке, можно объяснить тем, что при отжиге быстрорежущих сталей происходит насыщение карбонитрида $M_6(CN)$ вольфрамом (молибденом). Это снижает растворимость карбонитрида при последующем нагреве под закалку, что увеличивает количество вольфрама (молибдена) в карбонитридной фазе закаленных сталей.

Повышенное содержание хрома и железа в этой фазе термически необработанных сталей определяется также несколько большим количеством карбида (карбонитрида) $M_{23}C_6$. Можно предположить, что при наплавке в результате термоциклического воздействия дуги происходит выделение небольшого количества $M_{23}C_6$. При нагреве под закалку карбид $M_{23}C_6$ растворяется, что уменьшает долю железа и хрома в карбонитридной фазе. Следовательно, твердый раствор термически необработанных сталей получается более легированным вольфрамом (молибденом) и менее легированным хромом по сравнению с закаленными сталями.

Содержание элементов в твердом растворе определяли как разность между результатами общего химического анализа анодного осадка, отнесенного к массе растворенного металла. Наличие более легированного вольфрамом (молибденом) твердого раствора у наплавленных термически необработанных сталей можно объяснить также тем, что при наплавке присадочный металл в дуге нагревается до температур, значительно превышающих температуры закалки быстрорежущих сталей.

Таким образом, при указанных выше скоростях охлаждения твердый раствор наплавленных сталей получается более легированным

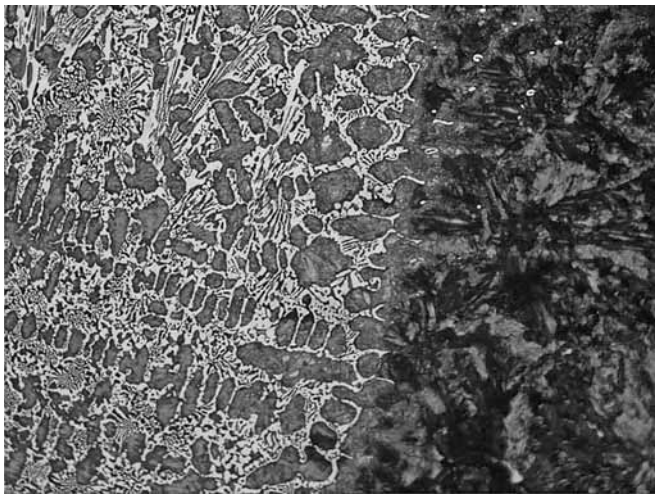


Рис. 4. Структура наплавленного и основного металлов в зоне их сплавления. ×500

вольфрамом (молибденом), чем термически обработанных. В этом случае теплостойкость и вторичная твердость наплавленных быстрорежущих сталей должны превышать теплостойкость и вторичную твердость термически обработанного металла. Вторичная твердость наплавленных термически необработанных сталей составляет 63...63,5 HRC и 62...62,5 HRC у Р6М5 и Р18 соответственно, что ниже на 0,5...1,0 HRC, чем у сталей, не подвергавшихся отжигу и закалке.

Наплавленные быстрорежущие стали типа Р18 и Р6М5, не подвергавшиеся термической обработке, содержат повышенное количество остаточного аустенита, имеют более легированный ($\alpha + \gamma$)-твердый раствор и пониженную твердость по сравнению с наплавленными, термически обработанными сталями.

Повышенное количество остаточного аустенита и более высокую легированность твердого раствора наплавленных сталей можно объяснить ускоренным охлаждением металла с температур, превышающих оптимальные температуры закалки быстрорежущих сталей, и замедленным охлаждением в интервале бейнитного превращения. Твердость после высокого отпуска наплавленных быстрорежущих сталей равна или несколько выше твердости термически обработанных сталей.

Типичная структура наплавленного металла после многослойной плазменной наплавки и высокотемпературного отпуска приведена на рис. 4 (микроскоп OLYPUS GX-51, раствор для травления — HNO_3, 3%-ный спиртовой раствор).

Заключение. Предложенный термический цикл наплавки с низкотемпературным подогревом позволяет получить наплавленный металл в закаленном состоянии с низким уровнем остаточных напряжений и обеспечивает высокую твердость наплавленного металла при относительно несложной технологии наплавки. Термическую обработку наплавленных деталей можно ограничить отпуском на вторичную твердость без предварительного отжига и закалки. Это существенно упрощает технологический процесс и дает экономию при изготовлении биметаллического инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Малушин Н.Н., Валуев Д.В.** Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. 358 с.
2. **Малушин Н.Н., Вострецова Т.Г.** Регулируемый термический цикл для плазменной наплавки прокатных валков теплостойкими сталями // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 3. С. 14—16.
3. **Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Осетковский И.В.** Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 10. С. 6—10.
4. **Федоров Н.С., Зубков Н.С., Крепышева Л.Б.** Влияние термической обработки на твердость и фазовый состав наплавленных быстрорежущих сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 1983. № 8. С. 59—63.

Николай Николаевич Малушин, канд. техн. наук,
nmalushin@mail.ru;
Ринат Акрамович Гизатулин, д-р техн. наук;
Андрей Петрович Ковалев;
Дмитрий Александрович Смагин;
Иван Васильевич Осетковский

УДК 621.771

В.Б. Мамаев, М.В. Мамаев
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева)

Моделирование влияния технологических факторов на протекание и результаты процессов осадки на основании метода траекторий главных нормальных направлений

Приведены результаты исследования влияния основных технологических параметров на картину и характер изменения сетки траекторий главных нормальных направлений, а также на форму, границы и размеры застойной области и области пластической деформации.

Ключевые слова: математическое моделирование; метод траекторий; осадка; напряженное состояние; анализ факторов.

Results of research of influence of the basic technological parameters on the history and the character of change to the grid trajectories of principal normal directions, and also on the form, limits and sizes of congestive the field and the field of plastic deformation are presented.

Keywords: mathematical simulation; method of trajectories; upsetting; stressed state; analysis of factors.

На основании ранее выполненных теоретических исследований [1—6] и разработанного программного продукта проведено компьютерное моделирование и выполнен анализ влияния основных технологических факторов на протекание и результаты процессов осадки.

Моделирование осуществлялось для условий плоского деформированного состояния.

В качестве исходного варианта для дальнейшего сравнения и анализа получаемых результатов был выбран случай, соответствующий процессу осадки длинной полосы с размерами поперечного сечения h_0 = 50 мм, b_0 = 40 мм и коэффициентом контактного трения μ_A = 0,1. При этом далее моделировался процесс осадки на конечную высоту h = 15 мм, что соответствует относительной деформации δ = 0,7.

В процессе моделирования предприняты попытки сопоставления результатов, получаемых по методу траекторий главных нормальных направлений, и с помощью программного продукта QForm 2D, как это показано на рис. 1.

При использовании программного продукта QForm 2D не удалось получить информации о конкретных значениях напряжений в отдельных точках, а также о методике определения среднего напряжения. Поэтому дальнейшее сравнение нельзя считать достаточно корректным.

Однако цветовая палитра среднего напряжения, полученная с помощью QForm 2D, при наложении ее на сетку траекторий хотя и косвенно, но позволяет судить о том, что между сравниваемыми результатами имеется достаточно удовлетворительная корреляция, как это видно, например, на рис. 1 и 2. Разница получаемых размеров находится ниже тех пределов, чем те, которые интересны на практике.

Еще на стадии разработки предлагаемой математической модели можно было сделать

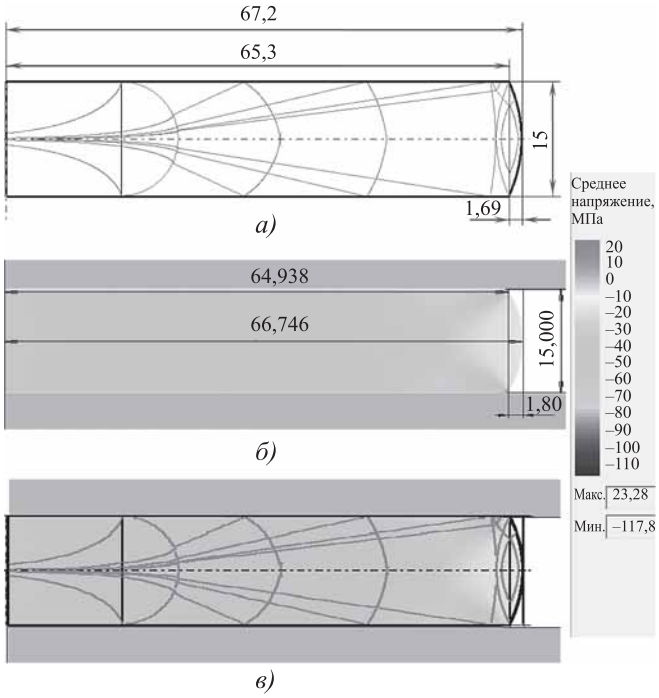


Рис. 1. Сетка траекторий главных нормальных напряжений σ_1 и σ_{23} (*а*), среднее напряжение — QForm 2D (*б*), наложение изображений *а* и *б* (*в*), полученные при следующих параметрах процесса осадки:

μ_A = 0,1; h_0 = 50 мм; b_0 = 40 мм; δ = 0,7; φ = 0,2 рад; $\varphi_{1/2КС}$ = 0,44 рад; $\varphi_{1/2КС} > \varphi$

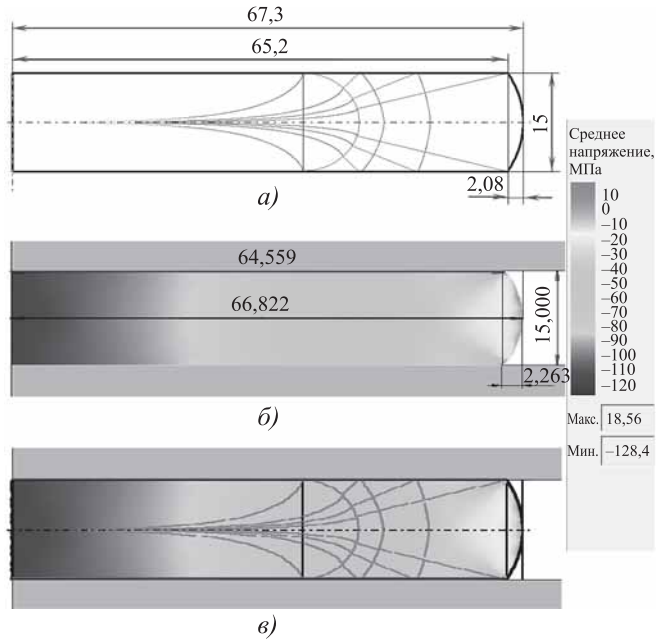


Рис. 2. Сетка траекторий главных нормальных напряжений σ_1 и σ_{23} (*а*), среднее напряжение — QForm 2D (*б*), наложение изображений *а* и *б* (*в*), полученные при следующих параметрах процесса осадки:

μ_A = 0,4; h_0 = 50 мм; b_0 = 40 мм; δ = 0,7; φ = 0,68 рад; $\varphi_{1/2КС}$ = 0,54 рад; $\varphi_{1/2КС} < \varphi$

заключение о том, что основными технологическими факторами, влияющими на ход и результат процесса осадки, являются следующие параметры: коэффициент контактного трения μ_A, относительная деформация δ и относительная высота исходной заготовки h_0/b_0 или h_0/d_0, а также их совокупное взаимодействие. Это является вполне логичным, даже с той стороны, что именно от них зависит, как это было показано ранее [1], изменяющееся по ходу осадки и искажения свободной поверхности граничное условие на стыке свободной и контактных поверхностей.

На рис. 3, в отличие от рис. 1 и 2, показано более детальное влияние коэффициента контактного трения μ_A при его изменении от

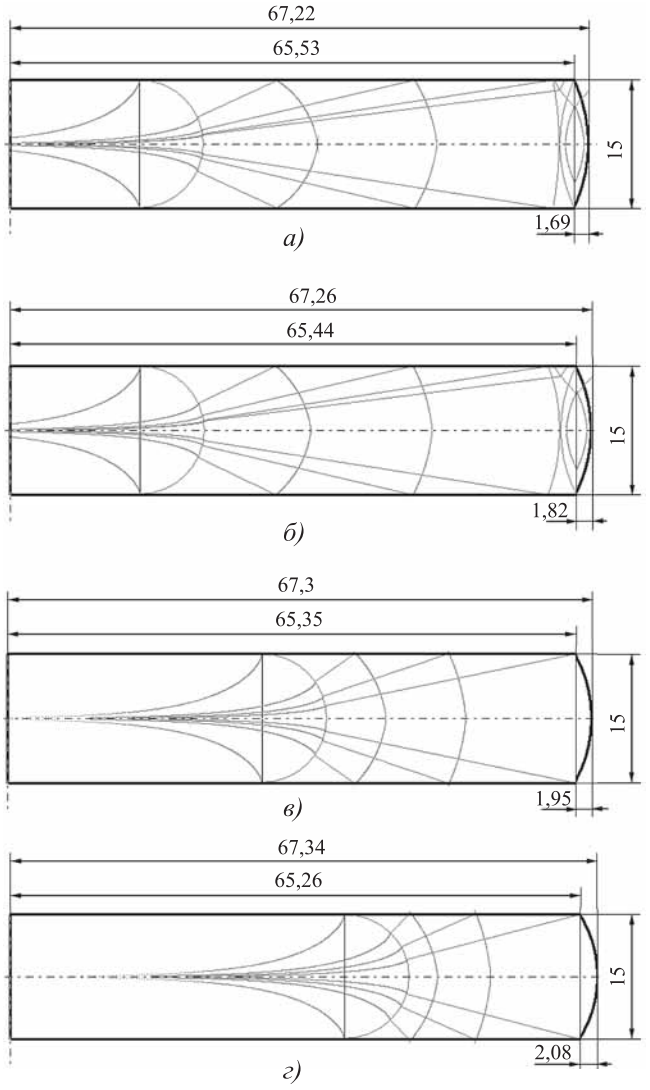


Рис. 3. Влияние коэффициента контактного трения μ_A на процесс осадки при h_0 = 50 мм; b_0 = 40 мм; δ = 0,7:

а — μ_A = 0,1; *б* — μ_A = 0,2; *в* — μ_A = 0,3; *г* — μ_A = 0,4

0,1 до 0,4. Моделирование показало, что при увеличении μ_A от 0,1 до 0,2 изменения настолько малы, что наблюдать их визуально практически невозможно. При этом установлено незначительное с практической точки зрения отличие в размерах.

Далее при росте коэффициента в пределах $0,2 < \mu_A < 0,27...0,28$ заметно увеличивается объем металла периферийной части заготовки, непосредственно примыкающей к свободной поверхности, который будет характеризоваться пониженными свойствами вплоть до образования рыхлот и признаков разрушения в виде расслоения. На контактной поверхности существенно уменьшается протяженность зоны скольжения и возрастают протяженность и объем зоны застоя—прилипания.

При $\mu_A > 0,27...0,28$ на периферийной части заготовки пропадают "всплеск" контактных напряжений и линзообразные области "разрыхления", что способствует повышению качества этой части поковки. В то же время, как это видно на рис. 3, при $\mu_A = 0,3$ и 0,4 и далее до 0,5 продолжают значительно уменьшаться протяженность зоны скольжения и возрастать протяженность и объем зоны застоя—прилипания, что отрицательно влияет на качество поковки центральной части осаживаемой заготовки.

Анализ эпюр напряжений на контактных поверхностях в исследуемом диапазоне показал, что среднее относительное напряжение σ_n/σ_s, а также нагрузка, требуемая для осадки, увеличиваются примерно в 2—2,5 раза.

Следующим основным технологическим фактором, влияющим на результаты осадки, является относительная деформация осаживаемого образца δ, которая варьировалась от 0,5 до 0,7. Первоначально моделирование осуществлялось для условий малого трения $\mu_A = 0,1$, как это показано на рис. 1 и 4.

На рис. 5 и 6 видно, что по мере возрастания относительной деформации при малом трении ($\mu_A = 0,1$) протяженность области прилипания и застоя снижается, а протяженность зоны скольжения и области пластического течения увеличивается, а при большом трении ($\mu_A = 0,4$) — наоборот.

Изменение относительной деформации в отличие от контактного трения не оказывает первостепенного влияния на характер напряженного состояния периферийной части заготовки, непосредственно примыкающей к свободной поверхности. На рис. 5 и 6 также видно, что увеличение относительной деформации δ от 0,5 до 0,7 не меняет общей картины траекторий главных направлений. Это наблюдается при низком и высоком значениях коэффициента контактного трения.

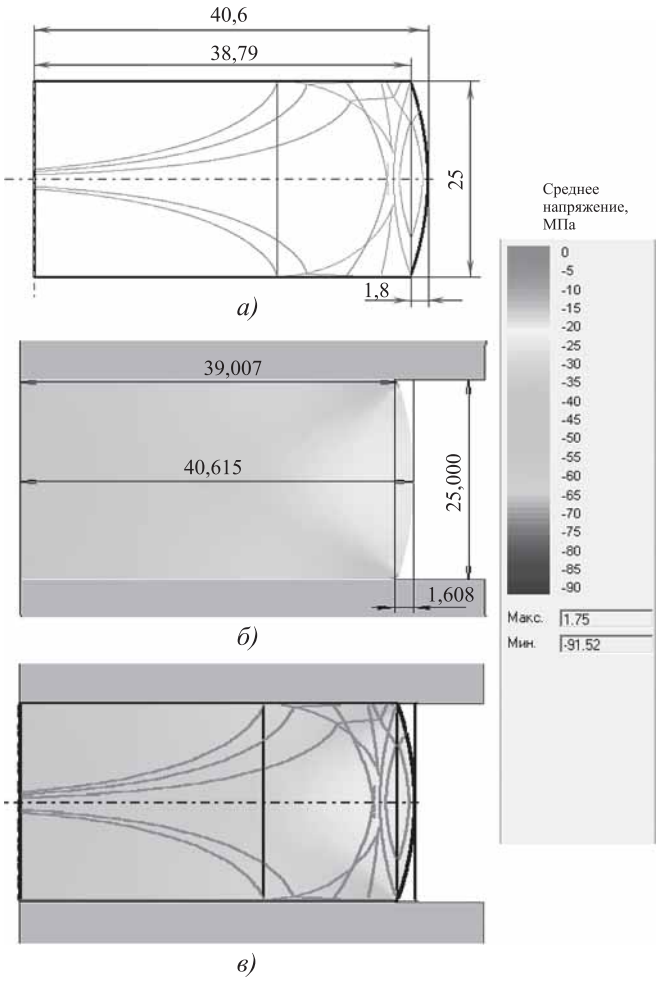


Рис. 4. Сетка траекторий главных нормальных напряжений σ_1 и σ_{23} (*а*), среднее напряжение — QForm 2D (*б*), наложение изображений *а* и *б* (*в*), полученные при следующих параметрах процесса осадки:

$\mu_A = 0,1$; $h_0 = 50$ мм; $b_0 = 40$ мм; $\delta = 0,5$; $\varphi = 0,2$ рад; $\varphi_{1/2КС} = 0,29$ рад; $\varphi_{1/2КС} > \varphi$

Анализ влияния относительной высоты исходной заготовки h_0/b_0 или h_0/d_0 от 1,5 до 1,0 показал, что как при низких, так и при высоких значениях коэффициента контактного трения существенных изменений сетки траекторий не происходит. Поскольку для возможности сравнения окончательная высота осаженной заготовки h принята одинаковой, то при этом изменялись относительная деформация и граничные условия в т. 2КС, т.е. угол $\varphi_{1/2КС}$.

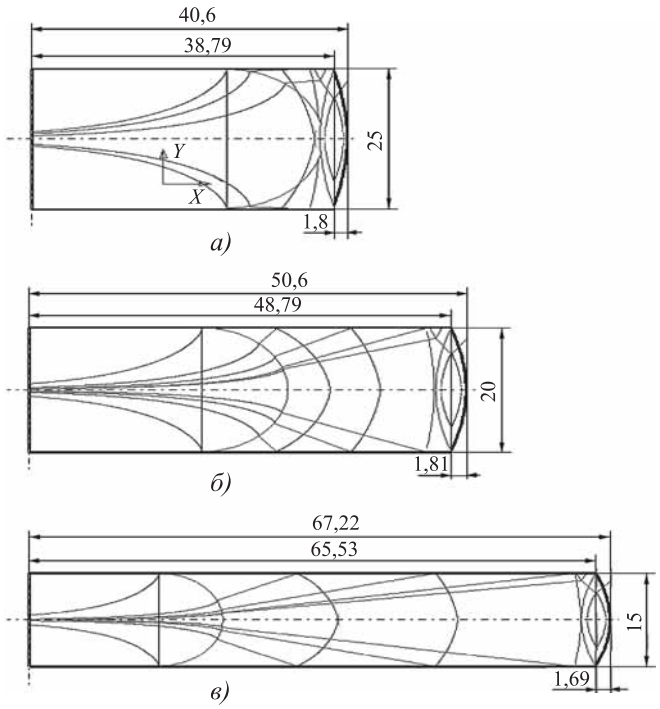


Рис. 5. Влияние относительной деформации δ на процесс осадки при h_0 = 50 мм; b_0 = 40 мм; μ_A = 0,1:
а — δ = 0,5; *б* — δ = 0,6; *в* — δ = 0,8

Следовательно, основными факторами, оказывающими решающее влияние на результаты процесса осадки, являются коэффициент контактного трения μ_A и относительная деформация δ, а относительная высота исходной заготовки h_0/b_0 или h_0/d_0 оказывает косвенное второстепенное влияние из-за необходимости изменения относительной деформации для обеспечения требуемых размеров осаженной заготовки.

Увеличение коэффициента контактного трения μ_A и относительной деформации δ приводит к повышению протяженности и объема зон застоя, т.е. пластически недеформируемых зон, что отрицательно влияет на свойства центральной части поковки, но при этом на ее периферийной части качество поковки увеличивается за счет исчезновения линзообразных областей. При этом подавляющее влияние оказывает коэффициент контактного трения, а не относительная деформация. Протяженность и объем области прилипания—застоя, а также наличие или отсутствие линзообразных областей, примыкающих к свободной поверхности, являются одними из основных критериев, позволяющих давать оценку эффективности деформационной проработки материала заготовки в результате процесса осадки.

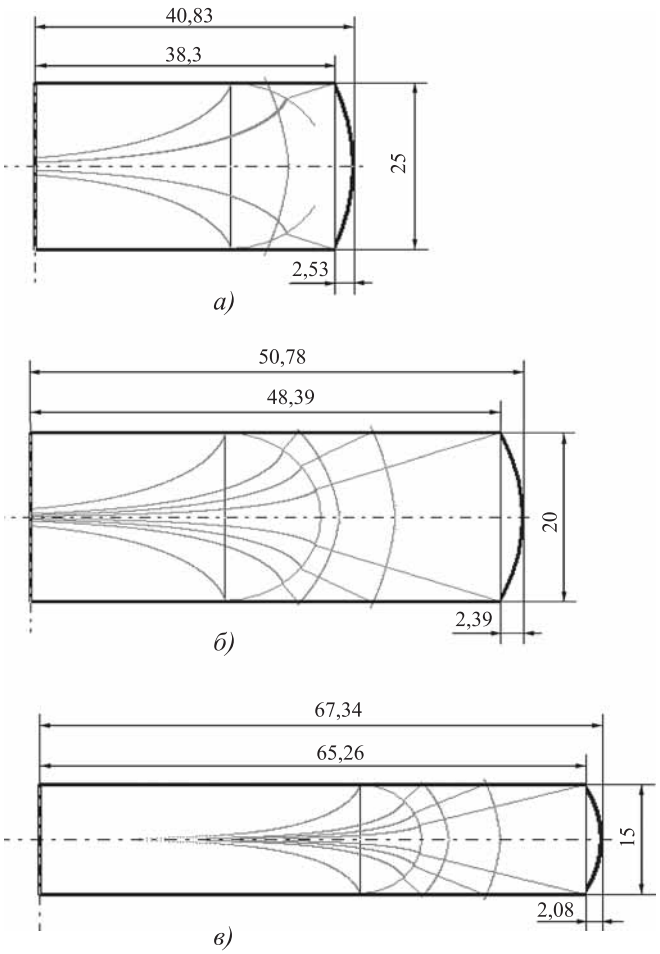


Рис. 6. Влияние относительной деформации δ на процесс осадки при h_0 = 50 мм; b_0 = 40 мм; μ_A = 0,4:
а — δ = 0,5; *б* — δ = 0,6; *в* — δ = 0,7

Анализ причин, порождающих эти линзообразные области, и их значение с точки зрения качества могут быть рассмотрены на примере осадки колец. Результаты экспериментальных исследований по осадке колец показали, что в зависимости от относительной ширины кольца $(R - r)/h$, где R и r — соответственно наружный и внутренний радиусы кольца, а h — высота кольца, а также коэффициента контактного трения можно наблюдать два варианта течения металла.

Первый вариант заключается в том, что у низких или относительно широких колец имеет место двустороннее течение металла (внутрь и наружу кольца), следовательно, имеется некоторая условная поверхность раздела течения металла с радиусом $r < \rho_H < R$. Искажение свободной поверхности происходит таким образом, что образующаяся выпуклость направлена в сторону течения металла.

Второй вариант происходит при осадке узких или относительно высоких колец и при малом трении. Тогда имеет место одностороннее течения металла только наружу, а поверхность раздела течения металла можно считать условной и лежащей внутри кольца, т.е. $\rho_H < r$. Искажение свободной поверхности, так же как и по предыдущему варианту, происходит с образованием выпуклости в сторону течения металла, т.е. наружная свободная поверхность по-прежнему является выпуклой, но внутренняя уже становится вогнутой в тело кольца.

Таким образом, по аналогии со вторым вариантом приведенного выше примера, можно предположить, что две линзообразные области, одна двояковыпуклая, а другая двояковогнутая с толщиной от т. 2КС до т. 4К на контактной поверхности и от т. 1СО до т. 3О на горизонтальной оси симметрии *m*, в сумме представляют некоторый объем. Этот объем может существовать вполне самостоятельно и проявлять себя так же, как и кольцо при одностороннем истечении в наружном направлении.

При этом при выработке граничных условий в работе [5] было принято следующее. На траектории главного направления 1, соединяющей т. 4К, где $\varphi_{1/4K} = \varphi$, т.е. при угле контактного трения, с т. 3О, так же как и на свободной поверхности, величина $\sigma_m = 0$ и является постоянной. Это позволяет сделать вывод, что в рассматриваемом случае осаживаемый образец можно условно разделить на две части, которые независимо друг от друга имеют свои граничные условия и где напряженное и деформированное состояния изменяются независимо от другой части. Граничные условия для внутренней части зависят только от контактного трения: $\varphi_{1/4K} = \varphi = \mathrm{arctg}(2\mu_A)$, а для наружной от коэффициента трения и относительной деформации и определяются с помощью расчета по формуле (10) [5], при этом $\varphi_{1/2KC} > \varphi$.

В результатах экспериментов, полученных различными исследователями при осадке цилиндрических образцов, заключенных в оболочку, а также при использовании для определения поверхности раздела течения металла при осадке составных колец достаточно часто наблюдается явление расслоения. Их причиной является условие $\varphi_{1/2KC} > \varphi$, приводящее к образованию линзообразных зон у края заготовки, особенно двояковыпуклой, непосредственно примыкающей к свободной поверхности.

Таким образом, результаты моделирования позволяют подтвердить мнение о важности влияния контактного трения на протекание, результаты и качество при реализации процессов обработки металлов давлением. Качественная разработка и проектирование технологических процессов должны предусматривать более детальный учет контактного трения и рассматривать и применять его в качестве управляющего фактора для достижения желаемого или требуемого результата.

Например, при изготовлении штампованных заготовок для деталей типа колес, в том числе и зубчатых, может рассматриваться задача обеспечения требуемых свойств в области ступицы и (или) на периферии, т.е. в области обода или зубьев. В этом случае в качестве наглядного примера могут быть использованы результаты моделирования, приведенные на рис. 3.

Несмотря на то что эти результаты получены для условия плоской деформации, а не для осесимметричного напряженного состояния, по ним можно сделать выводы о том, что компромиссным решением в данном примере, с одной стороны, может быть обеспечение коэффициента трения $\mu_A \approx 0{,}3$, что проблематично для горячей штамповки, так как в этом случае при использовании традиционных, широко известных и используемых смазок в лучшем случае можно достичь $\mu_A = 0{,}35$, а дальнейшее и существенное снижение трения возможно путем использования стеклоэмалей или расплавов солей. С другой стороны, как следует на основании рис. 6, может быть также использовано снижение допустимой относительной деформации за счет выбора в качестве исходных размеров заготовки с меньшей высотой.

В качестве другого примера о влиянии и роли контактного трения можно привести достаточно широко известные рекомендации, что для измельчения и выравнивания размера зерна при изготовлении заготовок ответственных деталей, а также для устранения такого явления, как ковочный крест, необходима трехсторонняя проковка. При этом односторонняя деформация ограничена из-за необходимости кантовки. Но главное, осадку рекомендуется осуществлять в шероховатых бойках или даже

в бойках с неглубокой насечкой, т.е. при максимальном трении. Увеличение контактного трения до максимального значения приводит к тому, что на краю осаженной заготовки пропадают линзообразные области разрыхления и расслоения, следовательно, вырождаются условия, приводящие к образованию ковочного креста.

С учетом приведенного выше, следует вывод о необходимости стремления к максимальному трению не только при осадке, но и в других процессах обработки металлов давлением. Однако он вступает в противоречие, например, с необходимостью обеспечения достаточно хорошего заполнения полостей штампа, снижения энергосиловых параметров штамповки, обеспечения приемлемой стойкости деформирующего инструмента. Последнее противоречие может быть подвергнуто сомнению.

В литературных источниках по обработке металлов давлением, учебниках и другой технической литературе вопрос о роли смазки освещен, зачастую, только с точки зрения необходимости снижения трения и забывая о другой функции — функции, обеспечивающей охлаждение рабочей поверхности деформирующего инструмента. В то же время в процессах лезвийной обработки широко используется такое понятие, как смазывающая и охлаждающая жидкость, что является более правильным.

Известно, что расчеты, выполненные с использованием современных методик и вычислительной техники, показывают, что даже при холодной обработке металлов давлением, например, в процессе холодного обратного выдавливания в точках, образующих кромку пунсона, температура может достигать 400...600 °С.

Таким образом, несмотря на то, что трение и его увеличение являются первопричинами роста удельных нагрузок и температуры на контактной поверхности деформирующего инструмента, решающим фактором для потери стойкости является снижение механических свойств материала инструмента, которое происходит вследствие роста температуры также и за счет неэффективного охлаждения.

В качестве выводов по данной части работы можно констатировать, что на основании использования метода траекторий главных направлений и в результате компьютерного моделирования выполнен анализ влияния основных технологических факторов на протекание и результаты процессов осадки. Он показал, что основным и решающим фактором, определяющим характер и картину сетки траекторий, является коэффициент контактного трения μ_A. Относительная деформация δ оказывает меньшее, но тем не менее существенное влияние. Относительная высота исходной заготовки h_0/b_0 или h_0/d_0 оказывает косвенное влияние в связи с необходимостью изменения относительной деформации для получения в результате осадки требуемых размеров.

Таким образом, по результатам ранее выполненных теоретических исследований [1—6] и компьютерного моделирования можно сделать общие выводы, которые сформулированы ниже.

Общие выводы

1. На основании исследований [1]—[6] и в данной работе на примере процессов осадки приведены теоретическое обоснование и анализ математической модели для оценки напряженного состояния методом траекторий главных нормальных направлений (напряжений и деформаций).

2. Выполнен анализ условия пластичности и граничных условий, положенных в основу предлагаемого метода, сформулированы основные базовые положения, особенности, свойства и допущения метода, разработан программный продукт, позволяющий в реальном режиме времени строить эпюры контактных напряжений, а также сетку траекторий главных нормальных направлений [4]—[6].

3. Предлагаемый метод позволяет определять углы наклона траекторий главных нормальных направлений в любой точке (элементарном объеме, конечном элементе) пластически деформируемого тела по всему его объему за исключением застойных областей, находящихся в состоянии упругого нагружения. Следовательно, в настоящее время он позволяет практически в любой точке определять напряженное состояние, а также, как будет показано в дальнейшем, и деформированное состояние.

4. Созданный на основании предлагаемой математической модели программный продукт позволяет в реальном режиме времени оценивать влияние основных технологических факторов на протекание и результат процесса осадки как визуально, так и численно. При этом речь идет не только о протяженности зон скольжения и прилипания (застоя) на контактной поверхности, но и по всему объему осаживаемого образца. Сетка траекторий главных нормальных направлений позволяет выделить форму, границы и размеры застойной области и области пластической деформации, в том числе области, где возможны разрыхления или даже расслоение.

5. Показаны возможности и эффективность использования предлагаемого метода на примере процесса осадки. С использованием созданного программного продукта и компьютерного моделирования выполнен анализ влияния основных технологических факторов, таких как коэффициент контактного трения μ_A, относительная деформация δ и относительная высота исходной заготовки h_0/b_0 на протекание и результат процесса осадки.

6. Полученные в работах [1]—[6] результаты открывают следующие дальнейшие перспективы для их практического использования:

— разработка математической модели по определению деформированного состояния в любой точке тела, находящегося в пластическом состоянии, и установление более детальной связи между напряжениями и деформациями;

— использование предлагаемых граничных условий и методики построения траекторий главных направлений, в других методах, использующих сетки, например, в методе конечных элементов;

— обеспечение возможностей применения метода траекторий главных нормальных направлений (распространение его использования для других процессов обработки металлов давлением);

— применение в качестве средства для экспресс-анализа влияния основных технологических факторов на протекание и результаты процессов пластического деформирования на стадиях обучения и дальнейшего изучения этих процессов и на производстве при нахождении если не оптимальных, то рациональных параметров и их сочетания; при необходимости, возможно, следует более эффективное использование полученных данных для моделирования с помощью программных продуктов QFORM 3D и DEFORM.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Мамаев В.Б.** Расчет контура свободной поверхности в процессах осадки и центрирование заготовок в ручьях штампов // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 8. С. 34—37.

2. **Мамаев В.Б., Мамаев М.В.** Математическое моделирование напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела. Ч. 1. Элементарный объем и его свойства // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 11. С. 26—31.

3. **Мамаев В.Б.** Анализ напряженного и деформированного состояния в элементарном объеме на примере процесса осадки // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. Т. 2. № 2. С. 115—120.

4. **Мамаев В.Б., Мамаев М.В.** Математическое моделирование напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела. Ч. 2. Анализ условий пластичности // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 2. С. 29—34.

5. **Мамаев В.Б., Мамаев М.В.** Условие пластичности и граничные условия на примере исследования напряженного состояния в процессах осадки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 10. С. 24—31.

6. **Мамаев В.Б., Мамаев М.В.** Метод траекторий главных нормальных направлений на примере исследования напряженного состояния процесса осадки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 11. С. 13—17.

Владимир Борисович Мамаев, канд. техн. наук,
vmamaev51@yandex.ru;
Михаил Владимирович Мамаев

УДК 621.7, 621.9, 621.89

Л. Мармонье
(компания CONDAT, Франция)

Высокоэффективные смазочные технологии и материалы для холодной объемной штамповки компании CONDAT

Приведены данные о современных высокоэффективных смазочных технологиях и материалах для холодной объемной штамповки французской компании CONDAT, позволяющие снизить производственные затраты и обеспечить высокое качество продукции.

Ключевые слова: холодная объемная штамповка; смазочные материалы; волочение; безфосфатная технология подготовки поверхности металла.

High effective lubrication technologies and materials of CONDAT company are presented. These materials allows to decrease production costs and brings to high quality of parts.

Keywords: cold forging; lubricants; drawing; non-phosphate metal surface treatment.

Компания CONDAT (Франция) была образована в 1854 г. и в настоящее время является одним из ведущих европейских производителей высокоэффективных смазочных материалов и других химических продуктов для различных отраслей промышленности: обработки металлов давлением и резанием, металлургической, нефтегазовой и горной промышленности, а также для эксплуатации различных машин и механизмов.

Штаб-квартира и основное производство компании расположено в городе Шасс-сюр-Рон (Франция). Компания также имеет представительства и производства в странах Северной и Южной Америки (США, Канада, Мексика, Бразилия и др.), Европы (Россия, Италия, Испания, Португалия и др.) и Азии (Китай, Индия, Южная Корея, Вьетнам и др.).

Компания CONDAT имеет свой научно-исследовательский отдел, в котором на основе большого технического опыта разрабатывают новые высокоэффективные качественные смазочные материалы с заданными свойствами для промышленного применения.

Среди новых перспективных разработок компании можно отметить смазочные материалы, подвергающиеся биологическому разложению после применения, материалы на основе растительного сырья и некоторые другие специальные материалы.

В области холодной объемной штамповки (ХОШ) компания CONDAT предлагает большой ряд смазочных материалов для различных операций ХОШ, удовлетворяющих всем предъявляемым требованиям, а также новые экологически безопасные материалы и технологии для высоконагруженных процессов ХОШ.

Подготовка поверхности проволоки перед ХОШ является важным этапом производственного процесса. В настоящее время в основном применяют процессы фосфатирования с нанесением мыла или известкованием.

Фосфатирование поверхности исходного металла (рис. 1) обеспечивает хорошие ре-

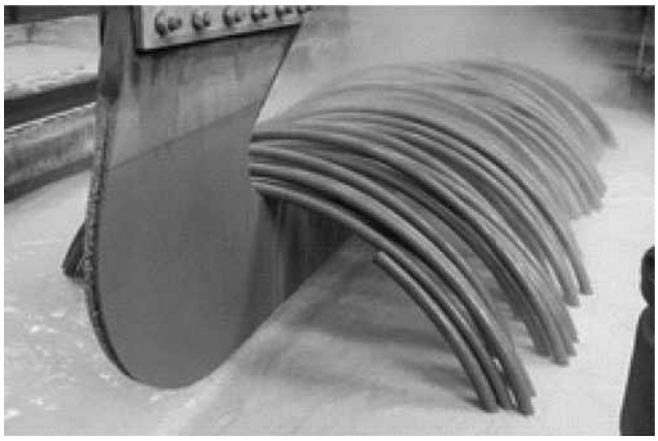


Рис. 1. Фосфатирование поверхности исходного металла в ванне

зультаты при волочении и холодной объемной штамповке углеродистых сталей, однако при этом имеют место проблемы с транспортировкой опасных веществ (сильных кислот), применяемых при фосфатировании, сложность контроля точной концентрации этих веществ в ваннах, неблагоприятная и опасная атмосфера для работы оператора, утилизация и обработка шлама и необходимость дальнейшего дефосфатирования перед термической обработкой, что приводит к увеличению производственных затрат. При этом в настоящее время на фосфатирование приходится до 40 % производственных затрат на подготовку металла перед ХОШ.

Одним из перспективных решений, разработанных и предлагаемых компанией CONDAT, является простая, эффективная и экологически безопасная обработка поверхности исходного металла по технологии EXTRUGLISS, позволяющей исключить химическое травление и фосфатирование исходного металла.

Технология EXTRUGLISS включает в себя следующие этапы:

— подготовка поверхности исходного металла (технология EXTRUGLISS ST);

— нанесение на исходный металл специального мыла перед волочением (технология EXTRUGLISS WD);

— применение специального смазочного материала для ХОШ (масло по технологии EXTRUGLISS).

При подготовке исходного металла по технологии EXTRUGLISS ST на его поверхности происходят быстрое осаждение минеральных солей и органических полимеров и создание необходимого слоя (рис. 2), толщина и структура которого обеспечивают лучшую адгезию и хорошее распределение смазочного материала при волочении проволоки и дальнейшей ХОШ.

Это приводит к повышению качества поверхности проволоки после волочения, увеличению однородности механических свойств металла и снижению остаточных напряжений в детали после ХОШ.

Технология EXTRUGLISS ST обеспечивает простоту транспортировки при использовании нетоксичных веществ, а также снижение затрат на переработку отходов.

Следующим этапом производственного процесса является нанесение на исходный металл специального мыла перед волочением (технология EXTRUGLISS WD) (рис. 3).

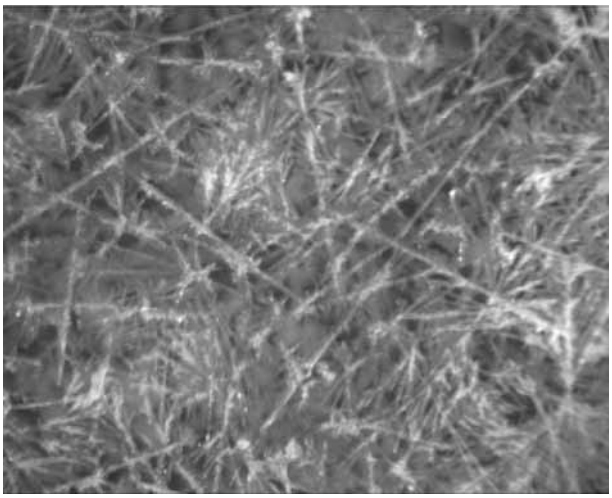


Рис. 2. Структура слоя из минеральных солей и органических полимеров на поверхности исходного металла при обработке по технологии EXTRUGLISS ST. ×20

Обычно перед волочением на поверхность исходного металла наносят сухое мыло, которое обеспечивает хорошее смазывание, но в дальнейшем происходит загрязнение смазочного материала для ХОШ, что приводит к увеличению вязкости масла, содержанию частиц фосфатного слоя и металла в виде суспензии, увеличению коэффициента трения и, соответственно, к уменьшению стойкости инструмента.

Компания CONDAT разработала специальное мыло по технологии EXTRUGLISS WD, применение которого повышает эффективность смазочного материала и обеспечивает невозможность вспышки вязкого осадка в холодновысадочном оборудовании.

При использовании технологии EXTRUGLISS WD в настоящее время срок эксплуатации смазочного материала для ХОШ увеличивается

Рис. 3. Нанесение мыла на исходный металл перед волочением

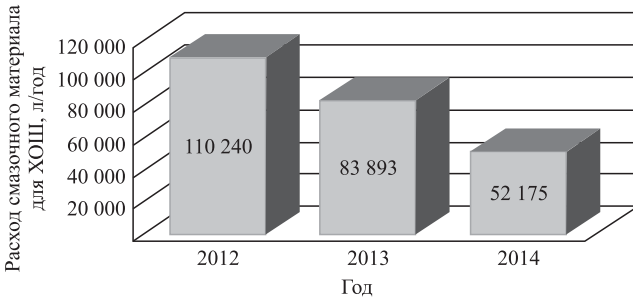


Рис. 5. Снижение расхода смазочного материала для ХОШ при использовании технологии EXTRUGLISS

более чем в 2 раза (более 1500 ч) по сравнению с традиционной технологией подготовки поверхности (рис. 4, см. обложку).

При использовании традиционных технологий примерно 90 % используемого смазочного материала для ХОШ остается на поверхности отштампованных деталей.

Для удовлетворения требований, предъявляемых к холодновысадочному оборудованию, компанией CONDAT были разработаны специальные смазочные материалы для ХОШ по технологии EXTRUGLISS, позволяющие резко снизить расход используемого масла и затраты на очистку отштампованных деталей.

На рис. 5 показано снижение расхода смазочного материала для ХОШ при использовании технологии EXTRUGLISS (2013—2014 гг.) по сравнению с традиционной технологией (2012 г.).

Также в смазочных материалах для ХОШ, разработанных по технологии EXTRUGLISS, происходит оседание мыла и других примесей, оставшихся на поверхности металла после волочения и дальнейшее их удаление вместе с абразивными металлическими частицами. В результате смазочный материал более длительное время остается чистым и обеспечивает наилучшие эксплуатационные свойства, что снижает затраты на замену масла.

Некоторые смазки, созданные по технологии EXTRUGLISS, имеют двойное назначение и могут быть использованы при ХОШ, а также для смазывания узлов холодновысадочного оборудования. Это приводит к снижению износа деталей оборудования, уменьшению расхода масла, увеличению стойкости инструмента, снижению затрат на замену масла и очистку отштампованных деталей.

На рис. 6 (см. обложку) приведены данные по параметру шероховатости и температуре отштампованной детали при использовании традиционной технологии и технологии EXTRUGLISS.

Заключение. Технология EXTRUGLISS имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной технологией подготовки поверхности исходного металла перед волочением и последующей ХОШ вследствие возможности контроля и управления всем производственным процессом на каждом его этапе.

Применение экологически безопасной технологии EXTRUGLISS позволяет снизить производственные затраты и обеспечить высокое качество продукции.

Лионел Мармонье,
Lionel.MARMONIER@condat.fr

УДК 621.777

Е.Н. Сосенушкин, Л.М. Овечкин*, А.Е. Сосенушкин
(Московский государственный технологический университет "Станкин",
**ФГУП "НПО "Техномаш", г. Москва)*

Показатели эффективности процесса равноканального углового прессования

Обсуждены результаты компьютерного моделирования и анализа кинематики течения металла в каналах матрицы при равноканальном угловом прессовании. Выявлено влияние значений радиусов сопряжения каналов на искажение приторцевых участков деформируемой заготовки, даны рекомендации по назначению рациональных радиусов сопряжения, которые минимизируют искажения геометрии заготовки. Сравнение результатов численного и физического экспериментов показало их удовлетворительную сходимость.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование; измельчение структуры; силы проталкивания; штамповая оснастка; компьютерные модели.

The results of equal channel angular extrusion process computer modeling and the analysis of metal flow kinematics in die mouth are discusses. The influence of channel conjugation radius on end-zone deformation of the blank is detected, recommendations are given to define the efficient channel conjunction radiuses, which will help to minimize blank geometry defects. Comparison of numerical and physical experiments shows their adequate convergence.

Keywords: equal channel angular extrusion; structure refinement; pushing forces; stamping tools; computer modelings.

Введение. Нанотехнологии, являющиеся одной из парадигм современной науки, постепенно переносятся из лабораторий в промышленное производство, например, в виде высокотехнологичных покрытий [1] на рабочие участки ответственных деталей, режущих частей инструмента для механической обработки, рабочих частей пуансонов и матриц штамповой оснастки [2] для формоизменения листовых и объемных заготовок, заметно увеличивая срок их службы [3, 4].

Для нужд машиностроения разрабатываются новые композиционные материалы [5], высокодисперсные порошковые материалы, которые находят применение в авиации и ракетно-космической отрасли. Последние инновационные технологические разработки [6] направлены на комплексное повышение физико-механических характеристик хорошо зарекомендовавших себя конструкционных металлов [7, 8] и сплавов на основе алюминия, магния, меди, титана и др. Это позволяет не только повысить эксплуатационные характеристики ответственных деталей, но и способствует уменьшению массово-габаритных характеристик отдельных узлов, оказывающих существенное влияние на общую компоновку изделия.

Наряду с использованием различных композитных материалов, в изделиях, для которых по техническим требованиям ограничено применение неметаллических материалов, широкое распространение получили металлические конструкционные материалы, характеризующиеся ультрамелкозернистой, а в предельных случаях и наноразмерной однородной структурой и обусловленными этим повышенными механическими характеристиками такими, как пределы упругости, текучести и прочности [9].

Такие материалы возможно получать, например, способами порошковой металлургии [10], всесторонней ковкой. Однако вероятная остаточная пористость может в дальнейшем негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках деталей, изготовленных из порошковых заготовок, особенно при возникновении вибрационного воздействия или

циклических нагрузок. Всесторонняя ковка в свою очередь не позволяет провести проработку структуры с достижением ее однородности по сечению заготовки за счет сохранения не полностью проработанных застойных зон.

Рассматривая традиционные технологические процессы прокатки и волочения, следует отметить, что при накоплении больших пластических деформаций и внутренних напряжений в обрабатываемой заготовке в ее структуре преобладают фрагменты с малоугловыми границами.

Целью работы является выбор просто реализуемого технологического процесса, обеспечивающего интенсивное измельчение структуры деформируемой заготовки за ограниченное число переходов и исследование геометрических и технологических параметров, управление которыми оказывает влияние на качество измельчения.

Актуальность и методы решения. Получить необходимую по размерам зерен структуру возможно при использовании специализированных методов циклической обработки металлов давлением, направленных на интенсивное измельчение зеренной структуры, с достижением ее однородности по сечению обрабатываемой заготовки. Одним из таких способов является процесс *равноканального углового прессования* (РКУП), заключающийся в повторяющемся продавливании заготовки через матрицу с пересекающимися каналами по определенным маршрутам, которые характеризуются углом аксиального поворота заготовки перед очередным помещением ее в канал матрицы. Каналы могут иметь круглое или квадратное поперечное сечение и пересекаться под углом $2\varphi = 90...140°$ (рис. 1).

РКУП характеризуется сравнительной технологической простотой реализации при высоком уровне эффективности, а также возможностью быстрой переналадки или замены исполнительных элементов в случае их износа.

Особенностью процесса РКУП является применение в качестве деформирующего инструмента так называемых "мягких" пуансонов или балластных заготовок, в качестве которых используют исходные и повторно деформируемые заготовки для достижения необходимого числа циклов РКУП, оказывающих влияние

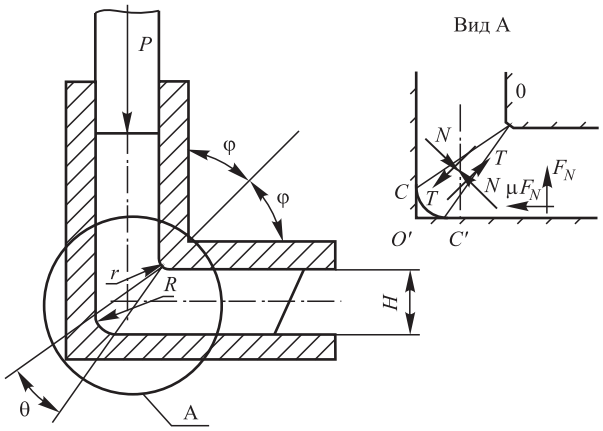


Рис. 1. Основные геометрические и силовые характеристики оснастки для РКУП:

P — сила прессования; *H* — размер сечения канала; *r* — внутренний радиус канала; *R* — внешний радиус канала; φ — половина угла пересечения каналов; θ — внешний угол канала

на накопление дефектов структуры — дислокаций. Механические характеристики материала балластных заготовок, применяемых в качестве пуансонов, следует выбирать либо выше характеристик материала прессуемых заготовок, либо уступающих основному металлу.

Деформационные и силовые параметры РКУП. При реализации процесса РКУП преобладает сдвиговый механизм деформации, при котором интенсивно измельчается зеренная структура.

Для оценки приращения интенсивности деформации сдвига при равноканальном угловом прессовании используют выражение [9]:

$$\Delta\Gamma = 2N\mathrm{ctg}\varphi, \qquad (1)$$

где N — число циклов прессования; φ — половина угла пересечения каналов, °.

В соответствии с выражением (1) приращение интенсивности деформации максимально при угле пересечения каналов $2\varphi = 90°$. Однако кинематика течения металла при данной схеме затруднена в связи с образованием зоны замедленного течения металла во внешнем угле сопряжения каналов. Это обусловлено геометрической разницей длины пути, который проходят материальные точки заготовки в канале в процессе прессования. Рассмотрим схему действия сил в каналах матрицы, возникающих в процессе деформирования заготовки (см. рис. 1, вид А).

По данным [9], возможно определить минимально необходимое гидростатическое давление p для заполнения внешнего угла канала:

$$p = k + 2k\frac{\pi}{4} \cong 2,57k, \qquad (2)$$

где $k = 0,5\sigma_т$ — постоянная пластичности прессуемого материала, МПа; $\sigma_т$ — предел текучести обрабатываемого металла, МПа.

В процессе РКУП возникают следующие стадии деформации: начальная стадия, при которой происходит смятие переднего торца заготовки и последующая ее осадка с постепенным заполнением очага деформации; установившаяся стадия деформации, характеризующаяся наличием сдвиговых деформаций и полным заполнением очага деформации. Однако по причине отсутствия противодавления возможно частичное незаполнение канала матрицы, что сказывается на геометрической форме получаемых заготовок, а именно искажении ее выходного торца.

Для устранения дефектов геометрии и создания условия всестороннего сжатия заготовки применяют систему противодавления в выходном горизонтальном канале матрицы удельной силой P_0.

Руководствуясь схемой действия сил, определим давление на нижнюю стенку выходного канала:

$$p_н = \sin 2\varphi\left(k + p\mathrm{ctg}\varphi\right). \qquad (3)$$

Противодавление со стороны выходного горизонтального канала находим по формуле

$$p_0 = p\left(1 - \mu\mathrm{ctg}\varphi\right) - k\left(\mu + \mathrm{ctg}\varphi\right), \qquad (4)$$

где μ — коэффициент трения металла заготовки о стенки канала при РКУП.

В случае, если значение противодавления p_0 предварительно задано, выражение (4) можно использовать для определения гидростатического давления на линии сдвига [9]:

$$p = \frac{p_0 + k\left(\mu + \mathrm{ctg}\varphi\right)}{1 - \mu\,\mathrm{ctg}\varphi}. \qquad (5)$$

При рассмотрении части заготовки, которая находится в приемном вертикальном канале матрицы, и, составив уравнение равновесия, спроецировав силы на вертикальную ось (см. рис. 1), получим выражение для вычисления удельной осевой силы в нижней части приемного канала:

$$p_{z0} = \frac{p_0 + k\left(\mu + \mathrm{ctg}\varphi\right)}{1 - \mu\,\mathrm{ctg}\varphi} + k\mathrm{ctg}\varphi. \qquad (6)$$

Геометрические параметры штамповой оснастки. Для повышения эффективности кинематики течения металла в очаге деформации необходимо конструктивно вводить радиусы сопряжения приемного и выходного каналов в оснастке (см. рис. 1). От внешнего радиуса сопряжения каналов R зависит угол пересечения каналов матрицы θ, который можно определить по формуле:

$$\theta = \pi - 2\varphi - 2\arccos\left(\frac{H}{\sqrt{H^2 + \left(H - R\right)^2}}\right), \qquad (7)$$

где H — размер поперечного сечения каналов, мм; R — радиус сопряжения внешнего угла канала, мм.

Учитывая (1) и (7), определяем приращение интенсивности деформаций сдвига:

$$\Delta\Gamma = 2\mathrm{ctg}\left(\varphi + \theta\right) + \frac{\theta\pi}{90}. \qquad (8)$$

Сила прессования заготовки:

$$P_1 = F\left(\frac{k\left(\mu + \mathrm{ctg}\varphi\right)}{1 - \mu\,\mathrm{ctg}\varphi} + k\mathrm{ctg}\varphi\right), \qquad (9)$$

где F — площадь сечения канала, мм^2.

Приращением деформации, согласно выражению (1), возможно управлять путем изменения угла пересечения каналов. Для этого целесообразно использовать оснастку с возможностью быстрой переналадки, в которой матричный блок состоит из комплекта быстросъемных вставок. Конфигурирование канала матрицы позволит учитывать показатель деформируемости различных металлов и сплавов.

Компьютерное моделирование влияния геометрических параметров на процесс прессования. Как уже отмечалось, ввиду особенностей процесса РКУП происходит искажение торцевых частей заготовки. Поэтому после прессования они подлежат правке или удалению

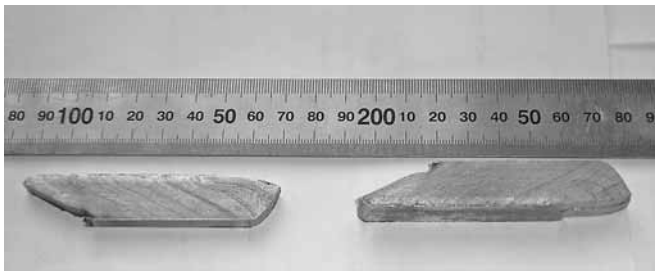


Рис. 2. Геометрия заготовок после одного цикла РКУП

искаженных участков механической обработкой, что приводит к увеличению трудоемкости процесса и снижению коэффициента использования металла (рис. 2), который определяется как отношение объемов исходной заготовки к продеформированной, у которой искаженные торцы отсутствуют.

Для предварительной оценки влияния геометрии канала матрицы на кинематику течения металла и величину искажения торцевой части заготовки в программном комплексе Q-Form было проведено моделирование с различными радиусами сопряжения каналов $r = R$ (рис. 3). Угол пересечения каналов составлял 90°. Поперечное сечение каналов 16×16 мм, модель материала — сплав АД1, температура процесса 20 °С, трение считали отсутствующим для моделирования общей картины процесса.

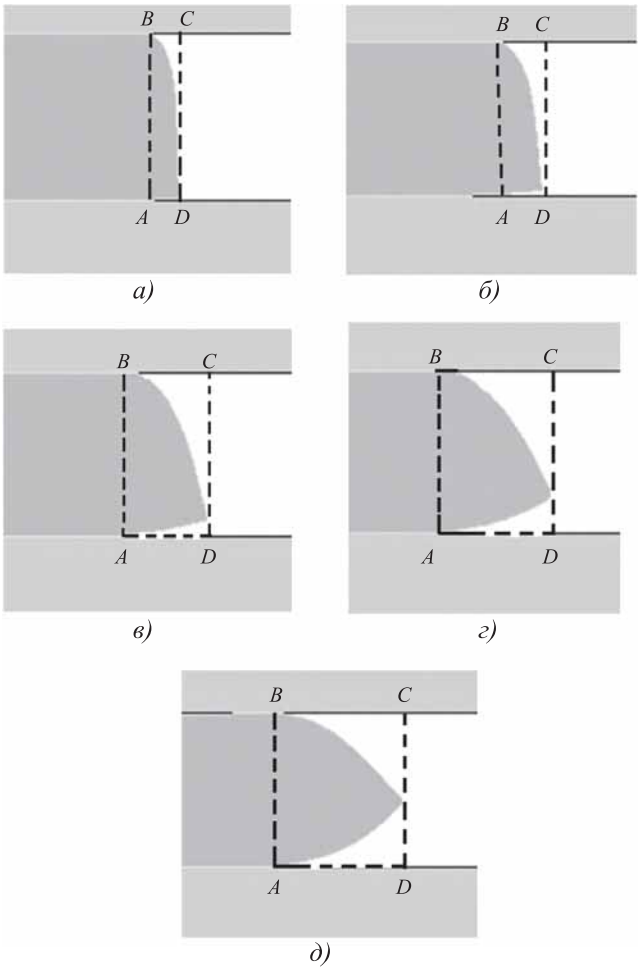


Рис. 3. Формоизменение выходного торца заготовки после одного цикла РКУП при различных радиусах сопряжения каналов $r = R$, мм:
а — 2; *б* — 5; *в* — 6; *г* — 8; *д* —10

Исследование показало, что с увеличением значения радиусов сопряжения свыше 6 мм происходит существенное искажение торцевой части заготовки. Также при дальнейшем увеличении радиусов сопряжения происходит смена механизма деформирования со сдвигового на изгибный, что не позволяет прорабатывать структуру заготовки до необходимых размеров зерен. Анализ выявил, что при сечении каналов 16 мм целесообразно использование радиусов сопряжения 2 и 5 мм, при которых реализуется сдвиговый механизм деформирования, а формоизменение торца заготовки минимально.

Экспериментальные исследования. Практические исследования были выполнены на экспериментальной оснастке с технологическими параметрами, соответствующими компьютерным моделям. В качестве технологической смазки использовали водно-графитовую эмульсию. Штамповая оснастка и получаемые заготовки представлены на рис. 4.

Для оценки степени изменения структуры заготовок за один цикл прессования из исход-

Рис. 4. Экспериментальная штамповая оснастка для РКУП и получаемые заготовки

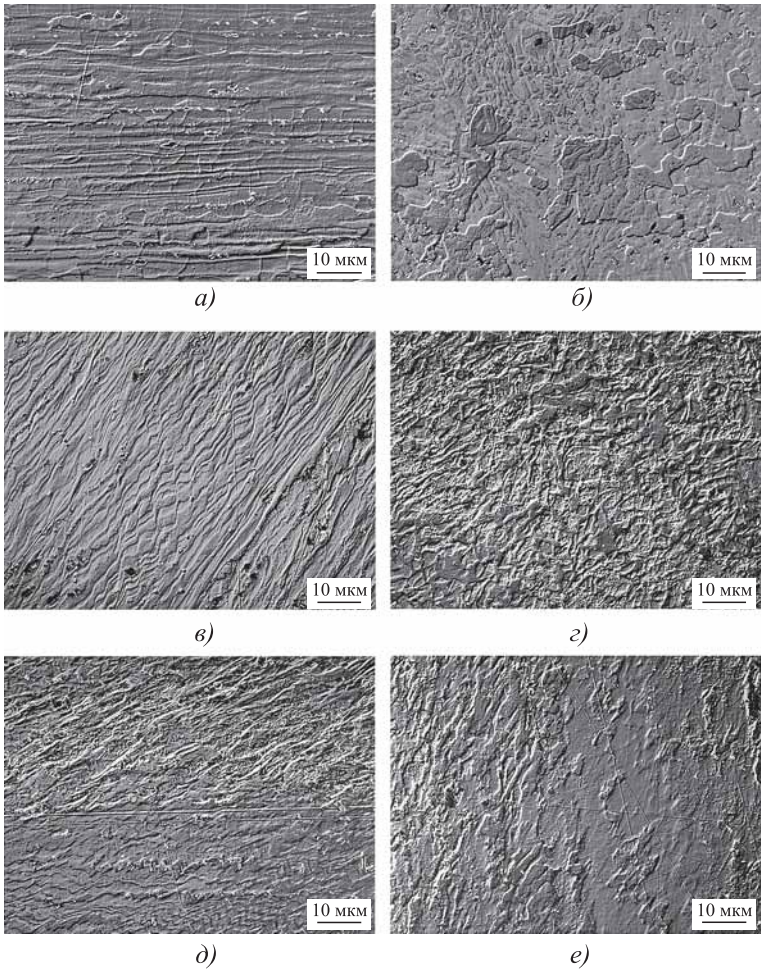


Рис. 5. Микроструктуры в процессе РКУП:

а, *б* — исходная заготовка, продольный и поперечный шлифы соответственно; *в*, *г* — один цикл РКУП, продольный и поперечный шлифы соответственно; *д*, *е* — два цикла РКУП, продольный и поперечный шлифы соответственно

ной заготовки, а также тех, которые подвергали одному и двум циклам прессования, были вырезаны образцы для проведения микроструктурного анализа, результаты которого приведены на рис. 5.

При оценке микроструктуры исходных образцов, вырезанных из холоднокатаного проката, отмечено, что она представляет собой волокнистую структуру, характерную для деформированного металла. В продольных шлифах из-за значительного вытягивания границы зерен в направлении пластического течения с трудом выявляются даже при относительно больших увеличениях (см. рис. 5, *а*). В поперечных шлифах волокнистость отсутствует (см. рис. 5, *б*).

После проведения одного цикла РКУП структура алюминия АД1 заметно изменяется. При увеличении ×1500 на продольном шлифе (см. рис. 5, *в*) наблюдаются почти полное исчезновение видимых первоначально границ зерен, связанное с уменьшением расстояния между волокнами, и сильная фрагментация зерен в поперечном шлифе (см. рис. 5, *г*). Кроме того, наблюдается образование характерной волокнистости структуры, что свидетельствует о значительной дополнительной пластической деформации после РКУП.

После двух циклов РКУП по маршруту B_C, при повороте заготовки вокруг оси на 90° в одну и ту же сторону сохраняется волокнистая структура в образце в продольном направлении (см. рис. 5, *д*), но при этом возникают участки, занимающие более 50 % объема, где волокна ориентированы под углом 45°. При этом наблюдается дальнейшая фрагментация структуры — уменьшение расстояния между волокнами и их вытягивание (полосчатость). На поперечном шлифе после двух циклов РКУП формируется волокнистая структура, что ранее не отмечалось (см. рис. 5, *е*). Это объясняется сложным пластическим течением металла и увеличением накопленной степени деформации.

Выводы

1. Выявлено соответствие результатов моделирования и эксперимента при оценке формоизменения торца заготовки.

2. Значение радиусов сопряжения каналов существенно влияет на искажение торцевых частей заготовки, что отражается на коэффициенте использования металла. Рекомендуются при размерах поперечного сечения заготовки 16×16 мм следующие радиусы сопряжения каналов: внешний 2 мм, внутренний 5 мм.

3. После двух циклов равноканального углового прессования структура заготовок подвергается интенсивной фрагментации, что

является причиной повышения уровня механических характеристик деформируемого металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Волосова М.А.** Исследование влияния комбинированной обработки на физико-механические характеристики оксидной и нитридной режущей керамики // Вестник МГТУ "Станкин". 2013. № 2 (25). С. 39—43.
2. **Сосенушкин Е.Н.** Развитие систем пластического деформирования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2. С. 12—20.
3. **Sosenushkin E.N., Khromenkov A.V., Melnik Yu.A.** Mathematical model of adhesive wear of three-dimensional dies // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35. Issue 6. P. 525—530.
4. **Селищев А.И., Набиуллина Л.К., Корнилова А.В.** Повышение стойкости оснастки для горячей объемной штамповки // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 3 (30). С. 58—61.
5. **Григорьев С.Н., Красновский А.Н.** Исследование энергосиловых характеристик формирования ультрадисперсных гетерогенных материалов // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 101—106.
6. **Сосенушкин Е.Н., Белокопытов В.В.** Разработка ресурсосберегающей технологии производства фланцевых поковок на универсальном оборудовании // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3 (11). С. 35—41.
7. **Ponomarev A.S., Sosenushkin E.N., Klimov V.N.** Effect of process features of pressure treatment on the microstructure and quality of parts of pipeline fittings from higt-strength cast iron // Metal Science and Heat Treatment. 2012. T. 54. № 1—2. P. 22—27.
8. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 41—44.
9. **Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др.** Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
10. **Дмитриев А.И., Коробова Н.В., Петров М.Д.** Разработка технологии производства корпуса гидроцилиндра из железного порошка // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 54—58.

Евгений Николаевич Сосенушкин, д-р техн. наук,
sen@stankin.ru;
Леонид Михайлович Овечкин;
Александр Евгеньевич Сосенушкин

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

Поздравляем

Андрея Львовича Воронцова,
доктора технических наук, профессора
с 60-летием!

3 сентября 2015 г. исполнилось 60 лет профессору, доктору технических наук Андрею Львовичу Воронцову.

В 1978 г. А.Л. Воронцов с отличием окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана, затем работал инженером-технологом в Центральном научно-исследовательском технологическом институте, с 1982 по 2010 г. был профессором кафедры "Прикладная механика" Московского государственного университета приборостроения и информатики, с 2010 г. работает в должности профессора кафедры "Технологии обработки материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана. В 1981 г. он защитил кандидатскую, в 2000 г. — докторскую диссертацию. В 2006 г. ему было присвоено почетное звание "Заслуженный деятель науки Российской Федерации".

Андрей Львович разработал теорию взаимосвязанного определения напряженного, деформированного и кинематического состояний металла при объемной деформации, позволяющую с высокой точностью рассчитывать технологические параметры различных процессов обработки давлением: волочения прутков и труб, малоотходной штамповки, многообразных видов выдавливания и осадки. Им были созданы расчеты для открытой прошивки, закрытой объемной штамповки, калибровки, чеканки, дорнования, секционной штамповки и других процессов формоизменения; его научные разработки были реализованы при получении монолитных, композиционных и порошковых изделий; при решении пластических задач обработки давлением он применял свой метод функции напряжений. Разработанные им новые технологические процессы были внедрены в МПО им. Румянцева, ПО "Ижсталь", НПП "Звезда", НИИ "Дельта", НИМИ, на заводах "Красный металлист" (г. Кострома) и "Филит" (г. Москва).

А.Л. Воронцов уделяет много времени вузовской учебно-методической и исследовательской работе. Он участвовал в разработке федеральной образовательной программы по курсу "Технология конструкционных материалов", успешно руководил научно-исследовательской работой школьников по программе "Шаг в будущее". В 2004 г. был награжден Почетной грамотой Министерства образования Российской Федерации.

А.Л. Воронцов опубликовал 560 печатных работ, в том числе 3 учебника и 5 учебных пособий для вузов с грифом Министерства образования и науки РФ, а также 11 монографий, имеет 30 авторских свидетельств на изобретение. 82 работы А.Л. Воронцова опубликованы в США.

А.Л. Воронцов является членом докторского диссертационного совета МГТУ им. Н.Э. Баумана, членом редколлегий журналов "Вестник машиностроения", "Производство проката" (руководитель теоретического раздела "Пластическая деформация металлов"), "Кузнечно-штамповочное производство".

Андрей Львович отличается разносторонностью творческих увлечений, он получил профессиональное образование художника-реалиста, пишет стихи.

А.Л. Воронцов является автором нашего журнала.

Коллектив редакции и редакционный совет журнала желают Андрею Львовичу здоровья, благополучия, новых профессиональных достижений и успехов на благо России!

УДК 621.735

М.В. Филиппова, А.В. Климов*, В.Н. Перетятько
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк,
**ОАО "Гурьевский металлургический завод")*

Качество мелющих шаров

Приведена технология прокатки и термической обработки шаров большого диаметра, которая обеспечивает получение шаров хорошего качества без трещин и разрыхления металла в осевой зоне. Твердость поверхностного слоя шаров из углеродистой стали превышает требования ГОСТа: для шаров диаметром 120 мм — в 1,55 раза, диаметром 80 мм — в 1,38 раза, для шаров из низколегированной стали диаметром 90 мм — в 1,45 раза.

Ключевые слова: прокатка шара; твердость; осевая рыхлость; термическая обработка; поверхностные дефекты; углеродистая сталь; низколегированная сталь.

The technology of rolling and heat treatment of large-diameter balls, which gives good quality balls without cracking and breaking of the metal in the axial zone is presented. The surface layer hardness of balls from carbon steels exceeds the requirements of the State Standards: for balls with diameter of 120 mm — by 1.55 times, diameter 80 mm — by 1.38 times, for low-alloy steel balls of 90 mm diameter — by 1.45 times.

Keywords: rolling of ball; hardness; friability axial; heat treatment; surface defects; carbon steel; low alloy steel.

Развитие добывающей и перерабатывающей промышленности ведет к увеличению потребления ею мелющих тел для измельчения руд, в том числе стальных шаров. Изготовление мелющих шаров методом поперечно-винтовой прокатки является наиболее высокопроизводительным процессом производства по сравнению с механической обработкой и объемной штамповкой.

Однако процесс поперечно-винтовой прокатки остается наиболее сложным процессом прокатки ввиду недостаточности применения к нему методов двумерного расчета обжатий, формоизменения и течения металла. Существуют проблемы оценки происходящих процессов, несовершенства схем и режимов прокатки. Требования потребителей к качеству мелющих шаров постоянно растут и превышают действующие стандарты.

Высокие требования к качеству продукции, а также расширение сортамента в сторону больших типоразмеров шаров (диаметр от 90 до 120 мм) привели к необходимости исследования процессов формоизменения металла в калибрах и оценки качества прокатанных шаров особенно крупного диаметра.

Одним из основных факторов процесса прокатки шаров в винтовых калибрах является определение режимов деформации, при которых отсутствует разрыхление металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия.

Известно (см. кн.: Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, М.В. Барбарин, М.В. Васильчиков и др. М.: Металлургия, 1971. 336 с.), что склонность металла к разрыхлению в осевой зоне повышается при уменьшении обжатия в перемычке за половину оборота заготовки, увеличении ширины реборды калибра, снижении температуры прокатки заготовки. В работе С.П. Грановского (см. кн.: Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах. М.: Металлургия, 1980. 116 с.) отмечено, что с уменьшением ширины реборды калибра склонность к разрыхлению

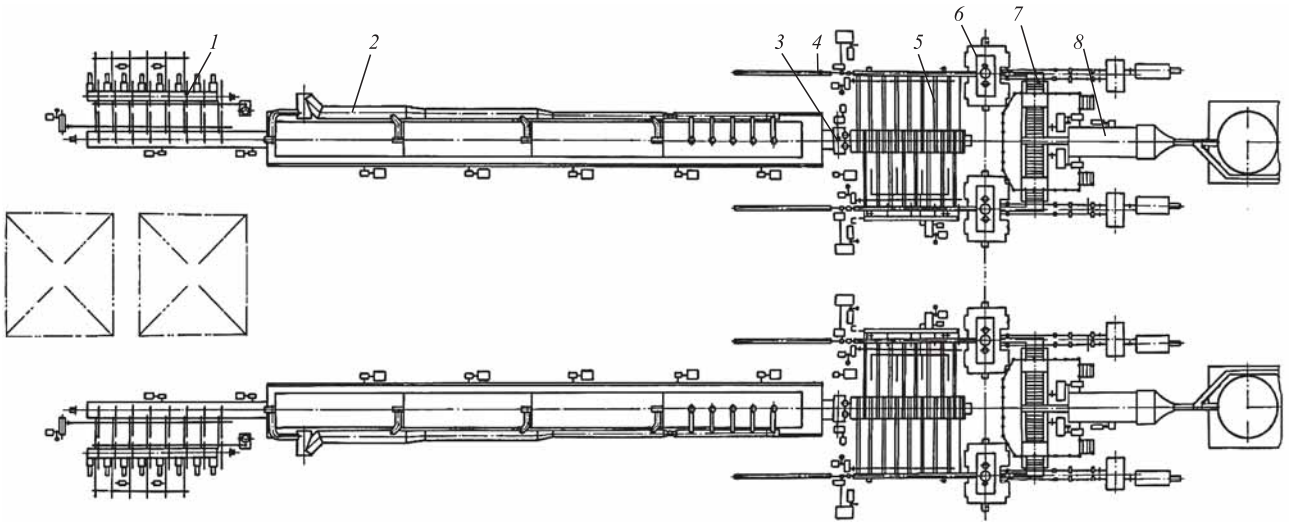


Рис. 1. Схема расположения оборудования в шаропрокатном цехе:

1 — механизм загрузки печи; *2* — проходная нагревательная методическая печь; *3* — механизм выгрузки печи; *4* — вталкиватель; *5* — приемный стол; *6* — рабочая клеть; *7* — ковшевой конвейер; *8* — закалочное устройство

металла в осевой зоне заготовки снижается и при отношении ширины реборды a к диаметру d перемычки $a/d \leqslant 1$ можно избежать разрыхления металла при высоких обжатиях.

Шаропрокатный цех ОАО "Гурьевский металлургический завод" расположен в двух корпусах. В корпусе № 1 установлены два одинаковых шаропрокатных комплекса ШПК 40-80. Схема расположения оборудования в шаропрокатном цехе приведена на рис. 1.

На шаропрокатном стане прокатывают шары из углеродистых и низколегированных марок стали. Процесс прокатки мелющих шаров происходит следующим образом. Заготовка для шаров, горячекатаные прутки круглого сечения длиной 4 м, подается на стол загрузочного устройства и с помощью дозатора и выравнивающего роликового конвейера раскатывается в один ряд, затем пакетами по 5...18 штанг (в зависимости от диаметра заготовки) одновременно подается на печной рольганг [1].

Нагрев заготовок проводится в двух одинаковых по конструкции проходных нагревательных печах с роликовым подом. Заготовки передвигаются в печи двумя параллельными рядами. Тепловой режим работы печи по зонам устанавливается с таким расчетом, чтобы температура металла перед прокаткой составляла 950...1100 °С. Температура нагрева заготовок зависит от диаметра прокатываемого шара.

Нагретые заготовки выдаются из печи и поочередно подаются к рабочей клети прокатного стана.

Рабочая клеть предназначена для прокатки шаров методом поперечно-винтовой прокатки. Прокатка осуществляется с помощью двух валков, вращающихся в одинаковом направлении. Валки, изготовленные из износостойкой стали, имеют однозаходные винтовые калибры. За каждый оборот валков прокатывается один шар.

Заготовка, попадая в калибр, начинает вращаться и, продвигаясь по оси прокатки, постепенно обжимается, приобретая форму шара, соединенного перемычкой с остальной частью прутка. На выходе из межвалкового зазора шарик проглаживается и полностью отделяется.

Одновременно валки захватывают новую порцию металла, и процесс прокатки протекает непрерывно, пока не прокатается весь пруток.

В работе использовали заводскую калибровку валков шаропрокатного стана. Расчет калибровки валков номинального диаметра 120 мм приведен в работах [2—4].

Далее прокатанные шары подвергаются термической обработке, которая в зависимости от марки стали и диаметра шара осуществляется по следующим технологиям:

— одностадийная закалка + самоотпуск;

— двухстадийная закалка + самоотпуск;

— одностадийная закалка + отпуск в нагревательной печи.

Углеродистые стали подвергаются самоотпуску, а низколегированные стали проходят отпуск в рольганговой электропечи.

Горячие шары после прокатки на стане по наклонным решеткам скатываются в ковшевой конвейер закалочного устройства. Ковшевой конвейер состоит из металлических ковшей, закрепленных на цепи. Из ковшевого конвейера шары высыпаются во вращающийся барабан первого закалочного устройства.

Закалочное устройство имеет вращающийся барабан с внутренними винтовыми витками и коллектор подачи закалочной среды (воды). При вращении барабана шары перекатываются по его поверхности, охлаждаясь при этом струями воды, подаваемой из коллектора, и перемещаются шнековым устройством (винтовыми витками) в осевом направлении в сторону выдачи. В концевой части барабана вода через отверстия в стенке барабана отводится по трубам в оборотный технический цикл, а шары через приемный лоток скатываются в контейнеры или попадают в ковшевой конвейер второй ступени закалки шаров. Шары большого диаметра подвергаются двойной закалке.

При двухстадийной закалке после первого закалочного устройства шары скатываются на горизонтально расположенный ковшевой конвейер. При транспортировании их до закалочного ротора (роторного элеватора) второй закалочной ступени происходит выравнивание температуры шаров по сечению, а при необходимости — падение температуры до необходимой.

Для обеспечения необходимой температуры шаров перед попаданием их в ротор предусмотрена система принудительного воздушного охлаждения, регулировка которой осуществляется с помощью запорной арматуры.

Длительность охлаждения шаров в барабане регулируется скоростью вращения барабана, интенсивностью подачи в барабан охлаждающей воды и зависит от температуры воды, качества исходной прокатанной заготовки (макроструктуры и теплоемкости исходной стали) и конечной, требуемой твердости шаров.

С ковшевого конвейера шары скатываются в роторный элеватор второй ступени закалки, где происходит окончательная закалка шаров.

Роторный элеватор второй ступени закалки состоит из вращающегося ротора с расположенными по его окружности полками для приема шаров, коллектора подачи воды и емкости для ее хранения. При вращении роторного элеватора шары, находящиеся на полках, охлаждаются в закалочной среде емкости. При необходимости понижения температуры шаров предусмотрено барботирование закалочной среды (воды) сжатым воздухом.

Шары из углеродистых сталей после закалки поступают в специальную тару, в которой происходит операция самоотпуска. Шары из низколегированных сталей проходят отпуск в рольганговой электропечи.

Согласно ГОСТ 7524—89 шары по твердости подразделяются на четыре группы. Шары групп 1 и 2 изготовляют из углеродистой, низколегированной и легированной конструкционной стали с массовой долей углерода в углеродистой стали не менее 0,40 % для шаров условным диаметром 16...60 мм и 0,60 % для шаров условным диаметром 70...120 мм. Углеродный эквивалент низколегированной и легированной конструкционной стали должен быть не менее 0,50 % для шаров условным диаметром 15...60 мм и не менее 0,70 % для шаров условным диаметром 70...120 мм. Шары группы 3 изготовляют из стали марок по ГОСТ Р 51685—2000 (рельсовая сталь), группы 4 — из инструментальной легированной стали по ГОСТ 5930.

Осмотр термообработанных шаров показал, что прокатанные шары имеют правильную геометрическую форму, и на поверхности отсутствуют дефекты, выводящие размеры шаров за пределы допуска. Замеры твердости поверхности шаров приведены в таблице.

Как видно из таблицы, твердость поверхности прокатанных шаров значительно выше, чем рекомендовано ГОСТ для шаров 1-й и 2-й групп. В целом качество шаров соответствует ГОСТ 7524—89 и ТУ 1171-078-00186223—2007 [5].

Для проверки качества металла внутренних слоев шары после термической обработки, разрезали по диаметральному сечению, проходящему через полюса (место отрыва перемычек) шара. После шлифовки темплета и удаления поверхностного наклепанного слоя проводили визуальный осмотр поверхности при 5-кратном увеличении. При осмотре на поверхности разреза дефектов в виде пористо-

Твердость поверхности шаров

Диаметр шара, мм		Термическая обработка	Твердость, HRC		
номинальный	фактический		Замер	ГОСТ 7524—89, не менее	
				1-я группа	2-я группа
Углеродистая сталь					
120	125	Закалка + самоотпуск	59	35	38
80	82		58	40	42
Низколегированная сталь					
90	93	Закалка + низкотемпературный отпуск	61	40	42
60	62		59	43	49

сти или микротрещин обнаружено не было. Далее замеряли твердость по всему сечению шара с шагом 5 мм.

В статье приведены экспериментальные данные по замеру твердости шара после термической обработки только по горизонтальному диаметру (место отрыва перемычек) шара и вертикальному диаметру шара.

На рис. 2, *а*, *б* представлены гистограммы распределения твердости по горизонтальному и вертикальному сечению шара из углеродистой стали номинальным диаметром 80 мм.

При анализе рис. 2, *а* можно отметить наличие двух зон с различными значениями твердости: подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 50...58 HRC

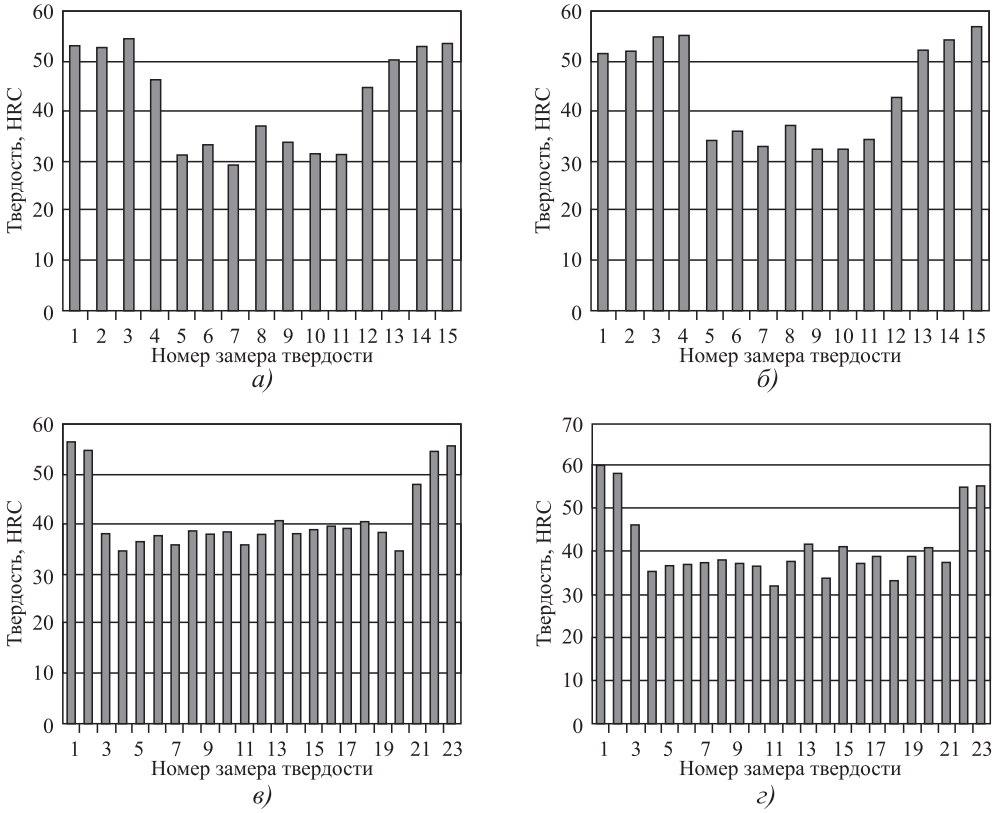


Рис. 2. Распределение твердости по горизонтальному (*а*, *в*) и вертикальному (*б*, *г*) сечению шара различных диаметров из углеродистой стали:

а, *б* — 80 мм; *в*, *г* — 120 мм

(среднее значение 54,1), и центральные слои металла диаметром 40 мм, имеющие более низкую твердость 30...37 HRC (среднее значение 32,5).

При анализе рис. 2, *б* можно также отметить наличие двух зон с различными значениями твердости: подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 50...58 HRC (среднее значение 52,6 HRC), и центральные слои металла диаметром 40 мм, имеющие более низкую твердость 30...37 HRC (среднее значение 34,3 HRC).

На рис. 2, *а*, *б* провалов твердости в центральной зоне шара не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии внутренних дефектов и хорошем качестве металла внутренних слоев.

Таким образом, технология прокатки шара номинальным диаметром 80 мм обеспечивает получение изделия без разрыхления металла в сердцевине заготовки.

Аналогичные замеры твердости по горизонтальному и вертикальному сечению шара номинальным диаметром 120 мм из углеродистой стали приведены на рис. 2, *в*, *г*.

При анализе рис. 2, *в* можно отметить, что с увеличением диаметра шара и изменения режима термической обработки твердость поверхностных и центральных слоев шара возросла. Также наблюдается наличие двух зон с различными значениями твердости: подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 55...58 HRC (среднее значение 55,6 HRC), и центральные слои металла диаметром 90 мм, имеющие более низкую твердость 35...42 HRC (среднее значение 38,5 HRC). Провалов твердости в центральной зоне шара не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии внутренних дефектов и хорошем качестве металла внутренних слоев.

Аналогичные исследования замеров твердости по вертикальному диаметру шара (см. рис. 2, *г*) показали, что поверхностная зона шара имеет твердость 55...60 HRC (среднее значение 57,1 HRC), и центральная зона шара имеет твердость 32...42 HRC (среднее значение

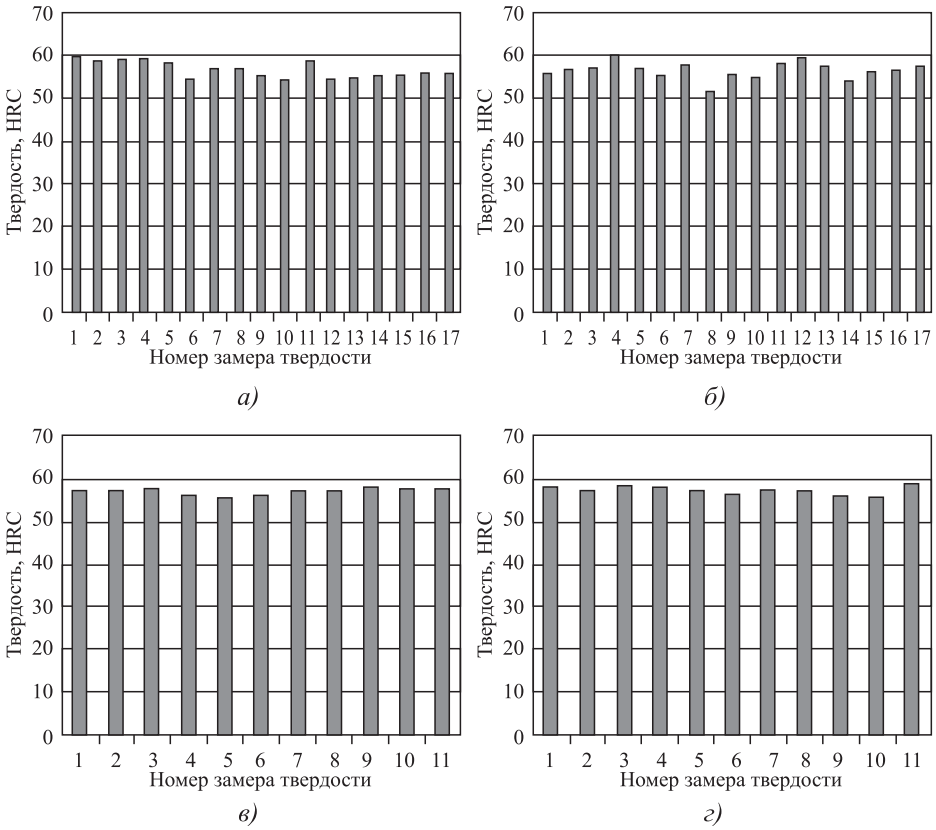


Рис. 3. Распределение твердости по горизонтальному (*а*, *в*) и вертикальному (*б*, *г*) сечению шара различных диаметров из низколегированной стали:

а, *б* — 90 мм; *в*, *г* — 60 мм

37,8 HRC). Провалов твердости во внутренних слоях шара не обнаружено, что говорит о хорошем качестве металла сердцевинной зоны шара.

Замеры твердости в диаметральной плоскости шара номинальным диаметром 90 мм из низколегированной стали после термической обработки приведены на рис. 3, *а*, *б*.

Исследования замеров твердости по горизонтальному и вертикальному диаметру шара (см. рис. 3, *а*, *б*) показали, что шар имеет одинаковую твердость 55...60 HRC (среднее значение 57,1 HRC) как по вертикальному, так и по горизонтальному диаметру. Провалов твердости во внутренних слоях шара также не обнаружено, что свидетельствует о хорошем качестве металла сердцевинной зоны шара.

Аналогичные результаты получены и на шарах диаметром 60 мм (рис. 3, *в*, *г*), имеющих одинаковую по всему сечению шара твердость 55...59 HRC (среднее значение 57,2 HRC). Провалов твердости во внутренних слоях шара также не обнаружено.

Выводы

1. Рассмотренная технология прокатки обеспечивает получение шаров хорошего качества без трещин и разрыхление металла в осевой зоне.

2. Твердость поверхностного слоя шаров из углеродистых сталей превышает требования ГОСТ для шаров диаметром 120 мм в 1,55 раза, диаметром 80 мм — в 1,38 раза и шаров из низколегированной стали диаметром 90 и 60 мм — в 1,45 и 1,20 раза соответственно.

3. Толщина закаленного слоя шаров из углеродистых сталей составляет 15 мм для шаров диаметром 120 мм и 20 мм для шаров диаметром 80 мм.

4. Толщина закаленного слоя для шаров из низколегированной стали диаметром 90 и 60 мм составляет 45 и 30 мм соответственно.

5. Приведенная толщина закаленного слоя достаточна для успешной работы шаровых мельниц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Перетятько В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В.** Производство горячекатаных шаров / Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: труды Всерос. науч.-практ. конф. Новокузнецк: СибГИУ, 2010.

2. **Перетятько В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В.** Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 27—30.

3. **Перетятько В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В.** Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 16—20.

4. **Peretyatko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V.** Roller grooving in ball-rolling mills // Steel in Translation. 2013. Т. 43. № 4. P. 168—170.

5. **Перетятько В.Н., Филиппова М.В., Климов А.С. и др.** Шаровая заготовка // Заготовительное производство в машиностроении. 2012. № 3. С. 17—19.

Марина Владимировна Филиппова, канд. техн. наук,
filippova_mv@mail.ru;
Александр Сергеевич Климов;
Владимир Николаевич Перетятько, д-р техн. наук

УДК 543/621.762

А.Н. Петров, Б.А. Логинов*, М.А. Петров
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ),
**Национальный исследовательский университет "МИЭТ")*

Разработка универсальной методики гранулометрического анализа металлических и неметаллических порошковых материалов и изделий из них, тонкой структуры зерен и процессов их агломерации

Рассмотрен вопрос исследования тонкой структуры частиц различных порошков на примере порошка термографита и порошков оксидов циркония, титана и свинца. Предложена методика исследования порошков на микро- и наноуровнях с построением отдельных дифференциальных и интегральных кривых распределений размеров частиц на каждом из них. Получены положительные результаты после проведения последовательной оптической и сканирующей зондовой микроскопии порошка термографита и готового изделия "пьезоэлемент", выполненной на базе одного прибора и по единой методике анализа порошковых материалов и изделий из них.

Ключевые слова: гранулометрический анализ; электронная микроскопия; оптическая микроскопия; сканирующая зондовая микроскопия; зеренная структура; нанозерно; высокодисперсный порошок; термографит; пьезоэлемент.

The current applied investigation deals with the understanding of the fine-grain structure of the powder particles of the thermal graphite and zirconium, titanium and lead oxides is considered. The successive microscopic analysis of the powders is performed for the micro- and nanolevels, the particles' size distribution represented by both differential and integral curves is obtained. At last the positive features both the optical and scanning probe microscopy are realised in one unit with the successive analytical system for powder materials and parts made from it.

Keywords: granulometric analysis; scanning electron microscopy; optical microscopy; scanning probe microscopy; grain structure; nano-sized grain; high dispersed powder; thermal graphite; piezo element.

Введение. В практике определения размеров частиц сыпучих веществ (порошков) существуют не менее шести групп методов измерений. К ним относятся: микроскопия (размер частицы при оптическом способе от 1 мкм и выше, при электронном — от 1 нм и выше), просеивание (размер частицы от 5 мкм и выше), седиментация (размер частицы от 1 мкм и выше), оптические и электрические счетчики Коултера (размер частицы от 200 нм и выше), рентгеновские дифрактометры, рассеяние лазерного излучения (размер частицы от 1 нм и выше) [1—4].

В зависимости от искомой функции на этапе анализа данных, полученных с аналитического прибора, частицы вещества представляются в виде эквивалентных сфер с определенным диаметром (при пересчете на постоянную скорость опускания, прохождении одной апертуры сита (размер отверстия сетки), одной площади поверхности, одном объеме и т.д.), что облегчает проведение алгоритма вычисления

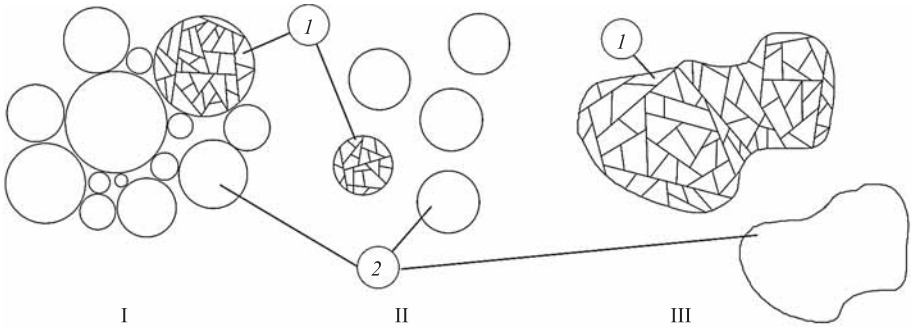


Рис. 1. Схематичное строение порошковых материалов:

I, II — конгломерированные и неконгломерированные частицы порошка со сферической морфологией поверхности соответственно; III — неконгломерированные частицы порошка с криволинейной морфологией поверхности (*1* — зерна, образующие частицу — тонкая структура частицы; *2* — частица)

и построение интегральных и дифференциальных кривых результатов измерений встроенной программой.

При таком подходе влияние морфологии (формы) частицы, а также ее внутреннего строения (так называемой тонкой структуры частицы) не учитывается (рис. 1). Каждый метод измерения рассчитан на определенную искомую функцию, которая не всегда может быть представлена в других координатах.

Разработка универсальной методики гранулометрии, исследования тонкой структуры частиц и процессов конгломерирования частиц в готовых изделиях для порошков с размерами зерен от нанометров до десятков микрон проводится по следующим актуальным причинам.

Во-первых, для возможности оптимизации технологий получения порошков и технологий изготовления из них различных изделий необходимо получать не просто распределение порошка по размерам частиц, как это позволяют делать известные методы и приборы гранулометрии, но и более подробную информацию, например, о морфологии частиц, его тонкой структуре, а также конгломератах, в которые могут собираться частицы.

Во-вторых, необходим поиск единого метода, обеспечивающего сквозное прослеживание динамики изменения гранулометрического состава порошка от его способа получения до его спекания в необходимое изделие и далее в процессе эксплуатационного износа изделия, что очень важно для оптимизации технологий изготовления, а также эксплуатационных характеристик изделий.

В-третьих, в современных технологиях наряду с традиционными материалами с размерами зерен от единиц до десятков микрон все чаще начинают применять материалы, в которых размер зерна уменьшен до сотен или десятков нанометров, что по теории Петча—Холла:

$$\sigma_т = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d_з}}, \qquad (1)$$

где σ_0 — начальное напряжение, вызванное движением дислокаций; K — сопротивление деформации материала по границам зерен; $d_з$ — средний размер зерна, увеличивает прочностные свойства материала, или изменяет интервал электропроводности тонких пленок [5]. Например, как показано в работе [6], твердость материалов, созданных на базе порошка с размером частиц 0,2 мкм, существенно выше той, которая наблюдается в материале, созданном на базе порошка с размером частиц 0,8 мкм.

Все это требует расширения методики гранулометрии и анализа в сторону нанометров. Также в современных условиях необходимо выбрать метод, базирующийся на отечественных приборах, в альтернативу имеющимся методам гранулометрии, в которых применяется импортное оборудование.

Для оптимизации отдельных технологических операций необходимо получение как можно более полной и наглядной информации о морфологии (форме, огранке и т.д.) частиц порошка. В первую очередь рассматриваются прямые методы, к которым относятся различные методы микроскопии.

Универсальной с точки зрения методики для наблюдения тонкой структуры частиц, необходимых для оценки морфологии частиц и всей структуры итоговых изделий, является электронная микроскопия. Однако присущие ей такие недостатки, как большая стоимость вакуумных аппаратов и их обслуживания, высокая сложность в использовании, требующая операторов с высшим образованием, большие габаритные размеры, требующие отдельных термостабильных помещений, существенно затрудняют ее использование в заводской практике.

Традиционную оптическую микроскопию, обладающую несомненными преимуществами (наглядность, простота в использовании, ценовая доступность), можно применять для оценки размера частиц и их конгломерирования. Однако она работает только в диапазоне невысоких увеличений, распознает объекты размерами не менее 1 мкм и не дает информации о форме и тонкой структуре зерен. К недостаткам оптической микроскопии относится высокая стоимость систем видеоввода и гранулометрического анализа, зачастую в десятки раз превышающую стоимость самих оптических микроскопов.

Современный принцип сканирующей зондовой микроскопии, авторы которого были удостоены Нобелевской премии по физике в 1986 г., не имеет указанных для оптических микроскопов недостатков. Она изначально позволяет получать кадры только в цифровом формате, легком для распечатки и математического анализа, и хорошо работает в диапазоне высоких увеличений; позволяет визуализировать атомы (размеры около 0,2 нм). Сканирующая зондовая микроскопия отлично работает в области исследования морфологии и тонкой структуры зерен, однако при этом она ограничена максимальным размером кадра [7, 8].

Так, широко распространенный в России серийный и входящий в Государственный реестр измерительных средств РФ сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000 имеет максимальный размер кадра 40 × 40 мкм, который даже при спецзаказе не может быть существенно расширен (максимально до 100 × 100 мкм), как и у других известных в мире микроскопов-аналогов сканирующего типа. В такие кадры при размерах частиц 10...20 мкм для большинства используемых в настоящее время порошков помещаются не более 100 частиц, которые являются частью статистического критерия оценки результата гранулометрического анализа, а также — участки изделий, полученные методами компактирования порошков или послойного спекания (аддитивные методы), для контроля их тонкой зеренной структуры.

Сканирующая зондовая микроскопия имеет практически такую же простоту и ценовую доступность, как и оптическая, так как не требует в отличие от электронной микроскопии вакуумирования образцов и наблюдения их в условиях вакуума. Для наблюдения порошков сканирующая зондовая микроскопия требует применения магнетронного напыления для закрепления частичек порошка на покровном стекле. Установки магнетронного напыления просты в использовании и могут быть изготовлены в виде настольного прибора.

Экспериментальные исследования. Работы проводили на зондовом микроскопе СММ-2000 установки Plasmoscope-2M (ЦКП МСТиЭКБ МИЭТ, Москва, Зеленоград), совмещенном с рядом оптических микроскопов (отечественные: МБС-10 и Микромед-6; импортные: Zeiss и Levenhuk (D670T)), оснащенных видеокамерами (рис. 2).

Такое совмещение микроскопов позволило использовать одну аппаратно-программную часть микроскопа СММ-2000. Кадры, полученные с оптического и сканирующего зондового микроскопов, анализировались единым математическим алгоритмом, в том числе и по алгоритму гранулометрии. В ходе измерений сопоставляли распределения размеров частиц (по кадрам оптического микроскропа) с размерами составляющих их зерен (по кадрам сканирующего зондового микроскопа). При этом была решена и единая метрологическая

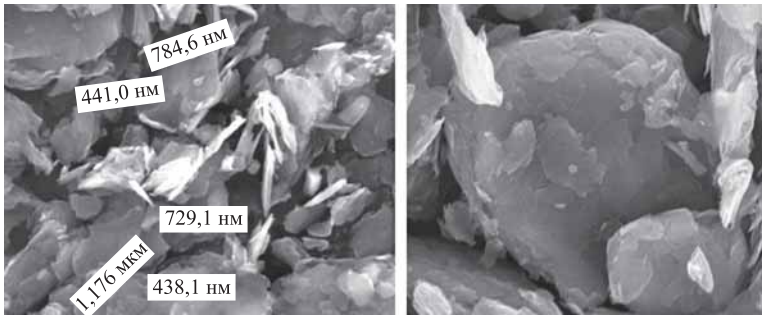
Рис. 2. Внешний вид совмещенного устройства (слева — сканирующий зондовый микроскоп; справа — оптический микроскоп, на заднем плане — кадр 3 × 3 мкм полимерного покрытия на металле)

база совмещенного устройства по эталону "Мера рельефная Кварц-XY1400/Z90 нм", входящему в состав сканирующего зондового микроскопа СММ-2000.

В качестве исследуемых материалов были использованы:

— высокодисперсный порошок термографита, применяемый в радиотехнике, приборостроении, машиностроении и других областях промышленности;

— смесь порошков оксидов металлов циркония, титана и свинца, применяемых в электронной промышленности для изготовления пьезоэлементов.



а) *б)*

Рис. 4. Кадр порошка термографита, полученного на растровом электронном микроскопе QUANTA 650, FEI:
а — ×5000; *б* — ×7500

Высокодисперсный термографит (коллоидный графит) широко применяют для производства токопроводящих покрытий и смазочных материалов для процессов холодного и горячего деформирования сталей и сплавов. Совершенствование технологии производства коллоидного графита дает возможность получать смазочные материалы и покрытия, применение которых для производства различных изделий в различных отраслях промышленности значительно повысит экономические показатели готового продукта [9, 10].

Результаты исследований. На рис. 3 представлено изображение порошка термографита, равномерно нанесенного тонким слоем на покровное стекло оптического микроскопа. На рис. 4 показан кадр того же порошка, нанесенного на подложку электронного растрового микроскопа. Размеры отдельных частиц графита находятся в диапазоне от 438 до 1176 нм. Микроскоп позволяет замерить отдельные зерна графита с различной кратностью увеличения, однако он не дает возможности вычисления и построения дифференциальных и интегральных кривых распределения зерен графита.

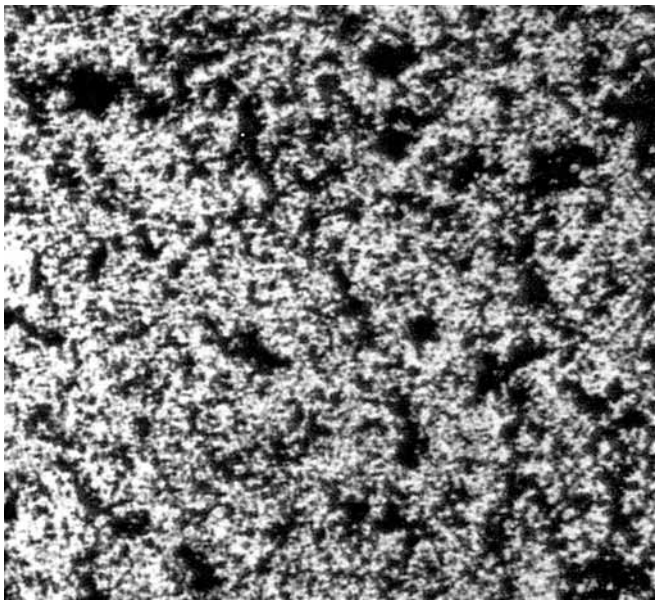


Рис. 3. Кадр порошка термографита, полученный на оптическом микроскопе (×200, размер кадра 1×1 мм)

Результаты работы программы выделения частиц и зерен, а также построения диаграммы распределения их по диаметру с вычислением характеристик этого распределения приведены на рис. 5.

На рис. 6 представлены стандартные кривые распределения дифференциального и интегрального типов.

Сравнение с приведенными на рис. 7 результатами анализа распределения частиц термографита по их размерам, полученными на импортном специализированном аппарате, показало хорошее совпадение результатов. Средний размер зерен в обоих случаях составлял около 8 мкм.

На рис. 8 показан кадр порошка термографита, полученный в сканирующем зондовом микроскопе. Его размер составляет 1,8×1,3 мкм, при этом в кадр попадают всего несколько частиц графита, которые видны в оптических микроскопах, но с таким высоким увеличением, что хорошо видна их тонкая структура (нанозерна) [11].

Работа программы выделения этих нанозерен в зависимости от диаметра для построения диаграммы распределения и вычисление характеристик этого распределения в виде

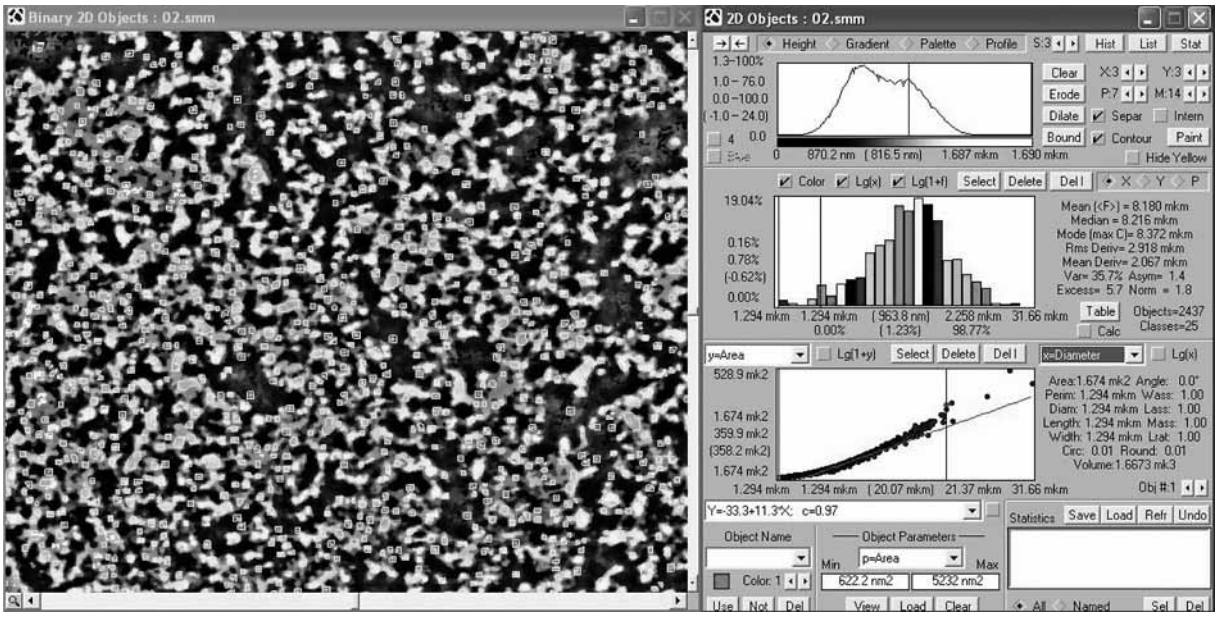
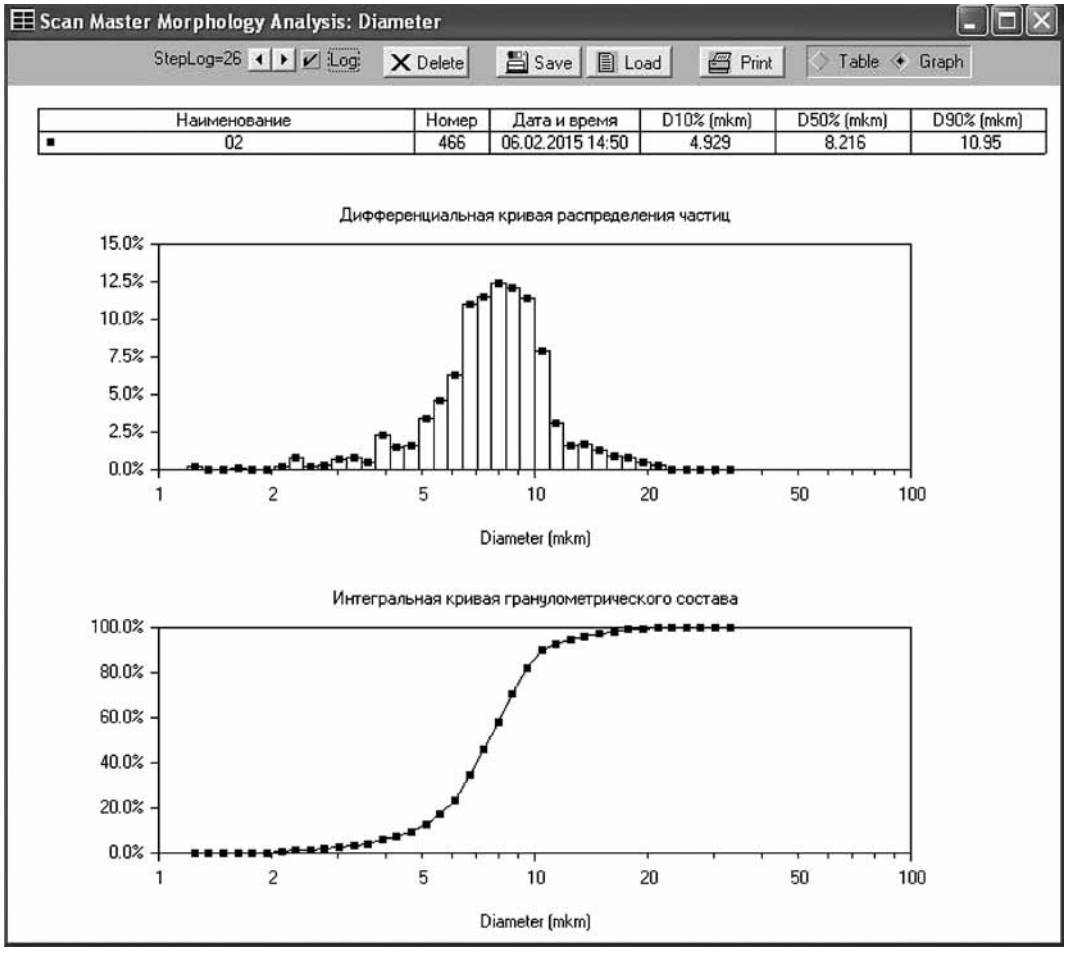


Рис. 5. Окно модуля программы выделения частиц термографита и анализа их распределения по размерам



Наименование	Номер	Дата и время	D10% (mkm)	D50% (mkm)	D90% (mkm)
02	466	06.02.2015 14:50	4.929	8.216	10.95

Рис. 6. Окно гранулометрических кривых распределения частиц термографита

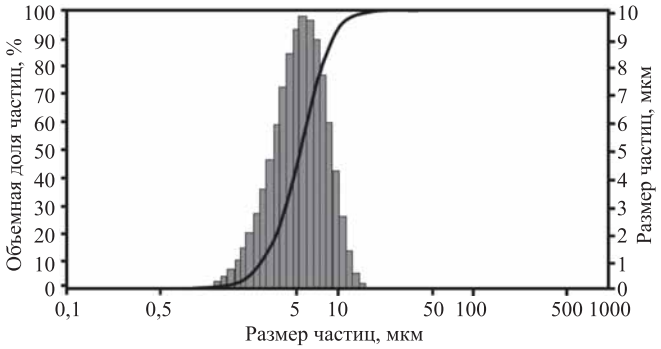


Рис. 7. Дифференциальное и интегральное распределения размера частиц термографита

стандартной дифференциальной и интегральной кривых приведены на рис. 9 и 10 соответственно.

Сравнение результата распределения нанозерен с полученными выше результатами распределения частиц показало, что частицы, имеющие средний размер около 8 мкм, состоят из нанозерен со средним размером около 80 нм, т.е. одна частица состоит примерно из 100 нанозерен. Получив тонкую структуру частицы, можно оптимизировать технологию получения порошка. Так, если добиться уменьшения среднего размера нанозерен, например, до 50 нм, получим существенное увеличение предела прочности частиц порошка термографита.

Рис. 8. Кадр порошка термографита, полученный на сканирующем зондовом микроскопе. ×100 000

На рис. 11 показан кадр структуры одного их примеров итоговых изделий — пьезоэлемента, выпускаемого заводом "ПРОТОН-МИЭТ" по порошковой технологии из смеси порошков оксидов циркония, титана и свинца [12, 13].

Исследования микро- и наноструктуры данного изделия показали, что после прессования и отжига по границам частиц образуются диффузионные связи, обеспечивающие плотный контакт между составляющими их нанозернами по всему объему изделия. Исходных частиц порошка размером 5 мкм не обнаружено, а есть только структура, образованная тонкой струк-

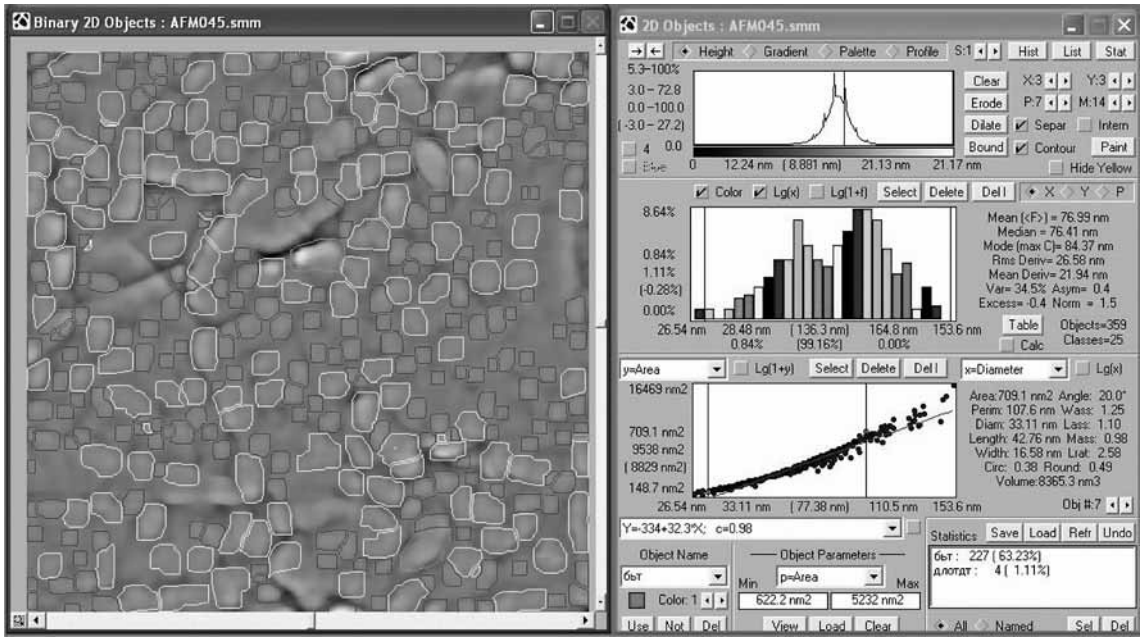


Рис. 9. Окно программы выделения нанозерен термографита и анализа их распределения по размерам

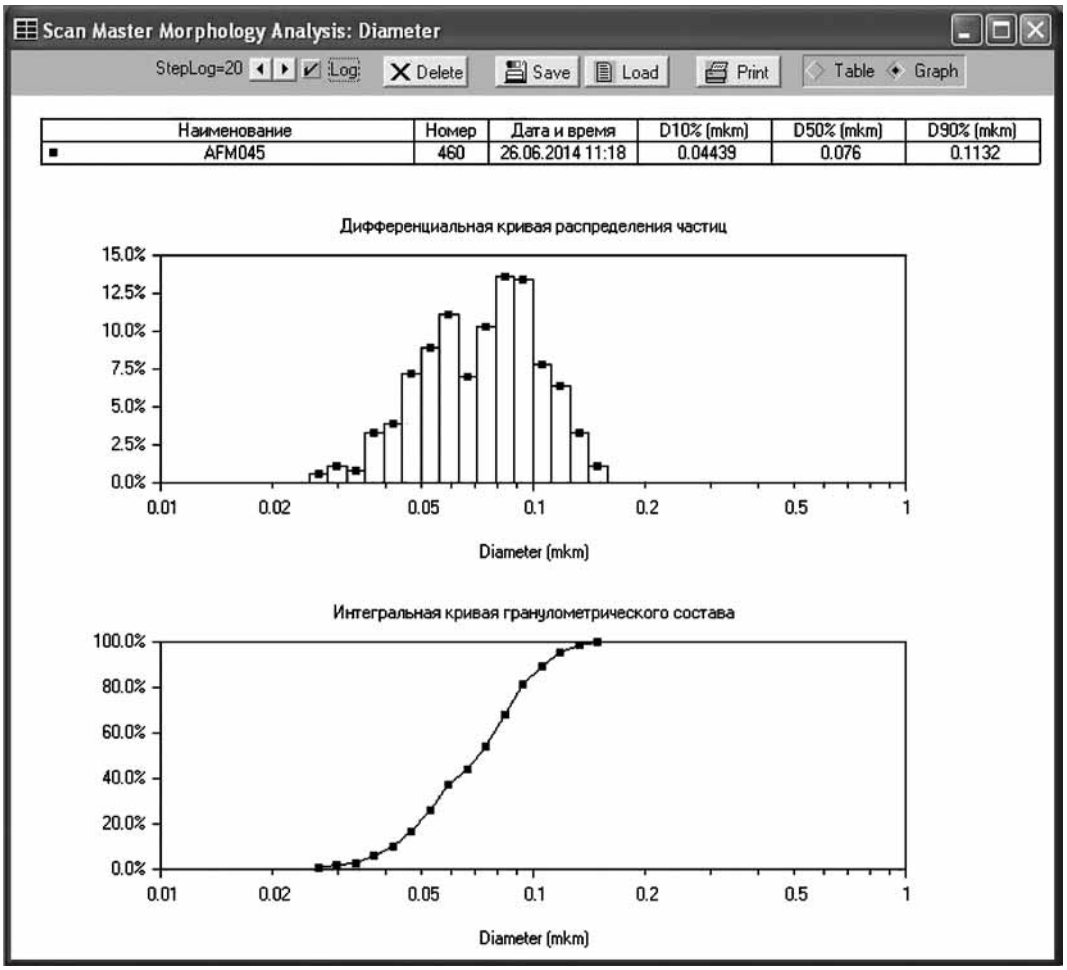


Рис. 10. Окно программы для отображения гранулометрических кривых распределения нанозерен термографита

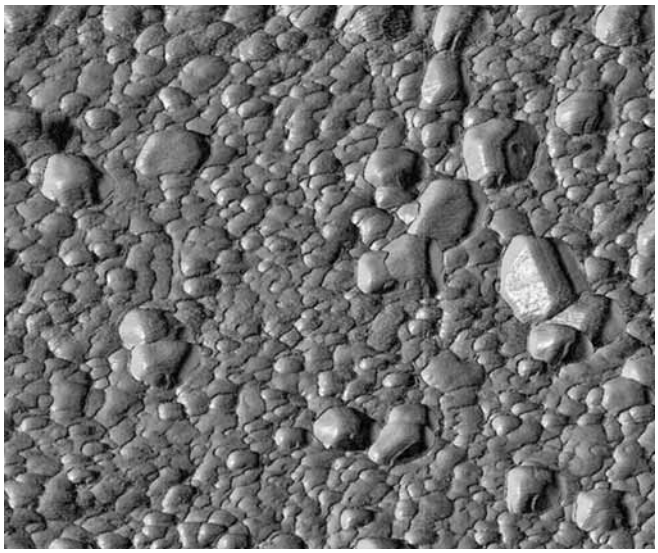


Рис. 11. Кадр зеренной структуры поверхности итогового изделия "пьезоэлемент", изготовленного из порошкового материала (получен на сканирующем зондовом микроскопе)

турой исходных частиц, в которой средний размер зерна составляет 50 нм (рис. 12).

Заключение. Совмещение оптического и зондового микроскопов в одном устройстве позволяет проводить сквозную гранулометрию, начиная от гранулометрии нанозерен, составляющих тонкую структуру частиц порошка, до гранулометрии частиц и далее до анализа зеренной структуры готовых изделий.

Цена устройства, совмещающего два метода микроскопии (оптической и зондовой), в 2—3 раза ниже цены импортных программ гранулометрического анализа.

На примере анализа поверхности структуры пьезоэлемента были рассмотрены микроструктурные изменения и взаимодействие тонкой структуры зерен, наблюдаемые в сканирующий зондовый микроскоп. Полученные данные о размере частиц порошка хорошо со-

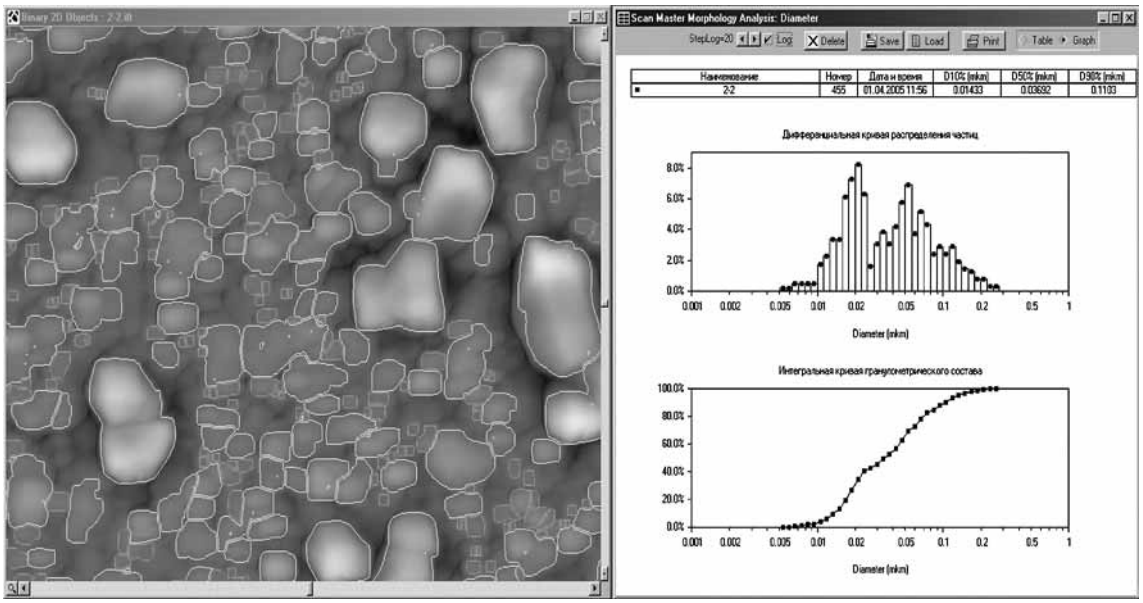


Рис. 12. Окно программы проведения гранулометрического анализа для изделия "пьезоэлемент", полученного из порошкового материала

впадают с данными, полученными на растровом электронном микроскопе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Naje A.N., Norry A.S., Suhail A.M.** Preparation and characterisation of Sn_2O nanoparticles // International journal of innovative research in science, engineering and technology. 2013. Vol. 2. Issue 12. P. 7068—7072.

2. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: РАН ИФМ, 2004. 114 с.

3. **Meyer E., Hug H.J., Bennewitz R.** Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Springer Verlag, Heidelberg, 2004. 210 p.

4. **Schulze D.** Pulver und Schüttgüter. Fliesseigenschaften und Handhabung. Springer, 2006. 508 s.

5. **Chou K.-S., Huang K.-C., Lee H.-H.** Fabrication and sintering effect on the morphologies and conductivity of nano-Ag particle films by the spin coating method // Nanotechnology. 2005. Vol. 16. P. 779—784.

6. **An investigation** of the influence of powder particle size on microstructure and hardness of bulk samples of tungsten carbide / T.S. Srivatsan, R. Woods, M. Petraroli, T.S. Sudarshan // Powder technology. 2002. Vol. 122. P. 54—60.

7. **Логинов Б.А.** Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия: учебно-методическое пособие. Москва: МИФИ, 2008. 224 с.

8. **Шульгин Б.В., Григоров И.Г., Логинов Б.А.** Методы и средства микроскопии: методические указания. Екатеринбург: ГОУ ВПО Уральский гос. техн. ун-т, 2005. 188 с.

9. **Петров А.Н.** Коллоидно-графитовые смазочные материалы в процессах горячего деформирования сталей и сплавов. Москва: Университет машиностроения, 2012, 212 с.

10. **Петров А.Н.** Комплексная оценка свойств коллоидно-графитовых смазочных материалов для процессов горячего деформирования металлов и сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2011. № 10. С. 45—48.

11. **Изменение** морфологии поверхности аустенитной хромомарганцевой стали при соударении со сверхзвуковыми частицами кобальта / Л.И. Иванов, Б.А. Логинов, О.Н. Никитушкина, А.Н. Петров // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 1. С. 37—40.

12. **Microstructure** and dielectric properties of $(La_{0,9}Sr_{0,1})[(Ga_{1-x}Cr_x)_{0,8}Mg_{0,2}]O_{3-5}$ (x = 0 − 0,35) oxigen-ion-conducting solid solutions / E.D. Politova, B.A. Loginov, G.M. Kaleva, A.V. Mosunov, S.G. Prutchenko // Inorganic Materials. 2006. Vol. 42. № 7. P. 806—814.

13. **Microstructure** and ionic conductivity of $(La_{1/2}Li_{1/3+x})TiO_3$ perovskite-like solid solutions / E.A. Fortalnova, M.G. Safronenko, N.U. Venskovskii, E.D. Politova, A.V. Mosunov, M.G. Zhizhin, B.A. Loginov // Inorganic Materials. 2007. Vol. 43. № 10. P. 1103—1108.

Александр Николаевич Петров, д-р техн. наук;
Борис Альбертович Логинов;
Михаил Александрович Петров, канд. техн. наук,
petroffma@gmail.com

В.Ю. Лавриненко *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

XII Международная научно-техническая конференция "Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем" в Севастополе

С 7 по 11 сентября 2015 г. в Севастопольском государственном университете состоялась XII Международная научно-техническая конференция "Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем". Работа конференции проходила по следующим тематическим направлениям:

- динамика и прочность, надежность и долговечность механических и биомеханических систем;
- математическое моделирование в теоретической и прикладной механике;
- механика процессов упругопластического деформирования;
- материалы конструкций и методы их исследования;
- диагностика технического состояния систем;
- энергетика механических систем.

В работе конференции приняли участие более 60 представителей вузов, научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий: Севастопольский государственный университет, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел, Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, г. Москва, Волгоградский государственный технический университет, Керченский государственный морской технологический университет, Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь; Медицинская академия им. С.М. Георгиевского, г. Симферополь, Ассоциация ортопедов и травматологов Крыма, Институт патологии позвоночника и суставов им. М.И. Ситенко, г. Харьков, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск; Запорожский национальный технический университет; Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск, Государственное предприятие "Электротяжмаш", г. Харьков.

На заседании конференции было заслушано 44 доклада.

Большой интерес вызвали доклады по направлению "Биомеханические системы", посвященные исследованию напряженно-деформированного состояния в тазобедренном суставе человека (В.А. Танькут, Институт патологии позвоночника и суставов им. М.И. Ситенко, г. Харьков), нормированию параметров микрорельефа на поверхности головки эндопротеза тазобедренного сустава (В.И. Пахалюк, А.М. Поляков, М.И. Калинин, Севастопольский государственный университет), использованию артикулирующих спейсеров в ревизионной хирургии тазобедренного сустава (Г.М. Кавалерский, В.Ю. Мурылев, Я.А. Рукин, П.М. Елизаров, А.В. Музыченков, Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова).

По направлению "Динамика и прочность" у участников конференции большой интерес вызвали сообщения, посвященные разработке экспериментальной оснастки для исследования влияния нагрева на процесс упрочнения комплексным локальным деформированием (С.Ю. Радченко, Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел), разработке концепции системной модернизации технологического оборудования для производства стальных канатов (В.Г. Хромов, Севастопольский государственный университет), моделированию процесса забивания сваи дизельмолотом (В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов, МГТУ им. Н.Э. Баумана), оценке выносливости объектов при циклическом нагружении (А.В. Неменко, Севастопольский государственный университет) и др.

По результатам проведения XII Международной научно-технической конференции было принято решение о целесообразности ежегодного проведения конференции на базе Севастопольского государственного университета по тематике: "Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем" для обмена опытом, обсуждения и решения актуальных проблем биомедицинской и машиностроительной отраслей промышленности с участием ведущих специалистов, студентов, аспирантов и молодых ученых учебных, научно-исследовательских и производственных предприятий РФ и зарубежных стран.

Владислав Юрьевич Лавриненко, д-р техн. наук

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2015 г.

Литейное и сварочное производства

Болдырев Д.А., Сафронов Н.Н., Иванов С.В. Снижение дефектности усадочного характера в отливках тормозных барабанов из серого перлитного чугуна № 6

Голубенцев А.В., Шатульский А.А. Повышение выносливости рабочих лопаток газотурбинных двигателей на основе совершенствования технологии литья № 6

Гуреева М.А. Модифицирование слитков алюминиевых сплавов системы Al—Mg—Si кальцием № 9

Гущин Н.С., Куликов В.И., Нуралиев Ф.А., Беляков А.И. Разработка импортозамещающей технологии изготовления мелющих элементов углеразмольной мельницы МПС-2650 № 12

Дриц А.М., Овчинников В.В. Свойства соединений листов алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием № 10

Дриц А.М., Овчинников В.В., Пахомов Д.А. Свойства сварных соединений нагартованных плит сплава 1565ч № 1

Жилин Д.И. Повышение эффективности шиберного затвора с дополнительным подогревом разливочного канала № 11

Кангезова Е.А., Овчинников В.В., Скакова Т.Ю. Микроструктура и механические свойства сварных соединений стали 08Х18Н10Т после длительной эксплуатации № 8

Кидалов Н.А., Осипова Н.А., Князева А.С. Технология изготовления формовочных смесей на основе водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента № 3

Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Шевченко С.Ю., Петров А.Ю., Лузгин В.И., Фризен В.Э. Комплекс на базе турбоиндукционного оборудования в технологии производства заготовок из композиционных материалов с алюминиевой матрицей методами тиксолитья № 7

Котелкин А.В., Звонков А.Д., Сосенушкин Е.Н., Матвеев Д.Б., Роберов И.Г., Лютцау А.В. Оценка технического состояния сварных соединений по уровню остаточных напряжений № 7

Лебедев В.А., Козырко О.А. Способы и устройства для управления кристаллизацией наплавленного металла при дуговой сварке (обзор и анализ) № 9

Лебедев В.А., Сараев Ю.Н., Драган С.В., Козырко О.А. Импульсные алгоритмы функционирования в механизированном оборудовании для дуговой сварки (состояние и перспективы) № 4

Леушин И.О., Лычагов А.С. Применение отходов слюды в составе защитных покрытий чугунных тиглей для плавки алюминиевых сплавов № 8

Леушина Л.И., Кошелев О.С., Леушин И.О. Повышение энергоэффективности стального литья по выплавляемым моделям № 5

Макаренко К.В., Тарасов А.А., Жижкина Н.А., Зенцова Е.А. Теоретическое обоснование модифицирования высокопрочного чугуна как способа измельчения графитовой фазы № 4

Малушин Н.Н., Гизатулин Р.А., Ковалев А.П., Смагин Д.А., Осетковский И.В. Влияние термического цикла наплавки с низкотемпературным подогревом на свойства наплавленного хромовольфрамового металла высокой твердости № 12

Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Гизатулин Р.А., Осетковский И.В. Влияние легирования наплавленного хромовольфрамового металла на формирование временных напряжений № 2

Овчинников В.В., Дриц А.М., Малов Д.В. Механические свойства сварных соединений сплавов 1565чМ и 1460Т1 в разноименном сочетании, полученных сваркой трением с перемешиванием № 6

Овчинников В.В., Манаков И.Н., Курбатова И.А. Свариваемость литейного сплава ВАЛ14 с деформируемыми сплавами 1151 и М40 № 11

Овчинников В.В., Новиков В.А., Малов Д.А. Сравнительные испытания заклепочных соединений алюминиевых сплавов, полученных различными методами клепки № 3

Раев А.В., Вальтер А.И. Компьютерная модель прогнозирования усадочных явлений на примере получения отливки из термопласта методом литья под давлением № 10

Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Технологические предпосылки повышения эффективности литья по выплавляемым моделям № 2

Серебряков С.П., Редькин И.А., Матвеев А.С. Совершенствование процесса сушки литейных оболочковых форм № 2

Федулова Ю.С., Изотов В.А., Акутин А.А. Комплексный подход к решению проблемы получения отливок из алюминиевых сплавов с применением дождевой литниковой системы № 1

Цурихин С.Н., Кязымов Ф.А., Бальбеков Р.Р. Методика исследования поверхностного слоя металла прошивной оправки на отслоение № 5

Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Система коррекции положения плавящегося электрода с использованием дуги в качестве датчика для автоматической сварки продольных швов по узкому зазору № 8

Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Гончаров С.Н. Пути повышения производительности сварки корпусных конструкций специальной техники № 5

Кузнечно-штамповочное производство

Албагачиев А.Ю., Фигуровский Д.К., Зернов Е.В., Якобовская И.М., Бухинник В.Н. Особенности формообразования прямоугольной пластины, осаживаемой шероховатыми плитами № 5

Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В., Малышев А.Н. Параметры формоизменения стержневых изделий с фланцами при закрытой осадке с выдавливанием № 3

Анцифиров А.А., Кривошеин В.А. Кинематические параметры штамповки на гидроколенных прессах с небольшой длительностью процесса деформирования № 2

Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Научные основы повышения эффективности процесса ковки при знакопеременной деформации № 3

Богатов А.А., Салихянов Д.Р. Конечно-элементный анализ повышения точности внутреннего канала труб конструкционного назначения № 6

Вдовин С.И., Татарченков Н.В., Лунин К.С. Позиционирование дорна при гибке труб № 2

Власов А.В., Пономаренко А.Б. Снижение силы деформирования при штамповке радиально-упорных металлофторопластовых подшипников скольжения путем оптимизации геометрических размеров заготовки № 5

Воронков В.И., Хамидулина А.А., Калпин Ю.Г., Соболев Я.А. Исследование зависимости изменения формы нейтрального слоя кольцевого образца при осадке от фактора трения № 9

Вяткин А.Г., Вяткин А.А., Матвеев С.В. Точность операции закрытой штамповки на винтовом прессе № 9

Гецци Э., Евдокимова Л. Технологии и оборудование для накатки резьбы и профилей компании "S.M.A.R.T. Treadrolling Solutions" № 1

Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. Технические решения для улучшения характеристик работы гидроприводов прессов № 4

Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С. Производство корпусных деталей выдавливанием, совмещенным с раздачей стенки, на специализированных гидравлических прессах № 7

Кобелев А.Г., Чашкин Д.С. Методика проектирования привода горизонтального бесшаботного молота с гидравлической связью масс № 9

Колотов Ю.В., Кобелев А.Г., Чашкин Д.С. Усовершенствование конструкции ударной массы штамповочного молота № 7

Коробова Н.В., Аксененко А.Ю. Исследование операции комбинированного выдавливания в "плавающей" матрице детали типа стакан с наружным полым стержнем № 7

Коробова Н.В., Дмитриев А.М., Толмачев Н.С., Аксененко А.Ю. Исследование высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок, сформованных на специализированных гидравлических прессах № 7

Мамаев В.Б., Мамаев М.В. Метод траекторий главных нормальных направлений на примере исследования напряженного состояния процесса осадки № 11

Мамаев В.Б., Мамаев В.М. Моделирование влияния технологических факторов на протекание и результаты процессов осадки на основании метода траекторий главных нормальных направлений № 12

Мамаев В.Б., Мамаев М.В. Условие пластичности и граничные условия на примере исследования напряженного состояния в процессах осадки № 10

Мармонье Л. Высокоэффективные смазочные технологии и материалы для холодной объемной штамповки компании CONDAT № 12

Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Теоретическое исследование параметров качества в процессе вытяжки цилиндрических деталей № 5

Панченко Е.В., Нам Т.В. Сверхпластическая формовка однослойной ячеистой оболочки из титанового сплава ВТ6С № 3

Паршин В.С., Карамышев А.П., Чумакова Л.А., Некрасов И.И., Чигринский А.Е. Динамика привода радиально-ковочной машины для подготовки концов труб к волочению № 11

Петров М.А., Басюк Т.С., Петров А.Н., Калпин Ю.Г., Петров П.А. Определение зависимости качества поковки от температуры вспышки смазочного вещества и температуры пуансона на примере горячей изотермической штамповки поршня двигателя внутреннего сгорания из алюминиевого сплава № 6

Поксеваткин М.И., Герман С.В., Басова Е.М. Особенности формообразования составного изделия из сборной заготовки № 8

Прусаков М.А. Глубокая вытяжка тонкостенной полусферы пуансонами с различным профилем № 7

Семеноженков В.С., Семеноженков М.В. Взаимосвязь точности позиционирования стола револьверной подачи и ее работоспособности № 2

Складчиков Е.Н., Панова И.А., Трух С.С. Предохранительное устройство для кривошипных горячештамповочных прессов № 1

Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Сосенушкин А.Е. Показатели эффективности процесса равноканального углового прессования № 12

Томилов М.Ф., Томилов Ф.Х. Оценка пригодности материала для производства деталей из листа с применением эластомеров № 8
Хван А.Д., Хван Д.В., Гехтман Д.А. Модернизированный пресс для штамповки с кручением № 4
Хван А.Д., Хван Д.В., Крук В.А., Воропаев А.А. Изготовление цилиндрических поковок продольной осадкой № 1
Чудин В.Н., Соболев Я.А., Пасынков А.А. Изотермическая осесимметричная осадка в условиях вязкопластичности материала № 6
Яковлев С.С., Митин О.Н. Редуцирование профильным пуансоном трубных заготовок через коническую матрицу № 10

Прокатно-волочильное производство

Арюлин С.Б., Камоничкин Д.Т. Определение параметров очага деформации при прокатке полосы на маятниковом стане № 9
Арюлин С.Б., Камоничкин Д.Т. Решение вопроса продольной разнотолщинности полосы при планетарной прокатке № 6
Гурьянов Г.Н. К оценке коэффициента трения при волочении круглого сплошного профиля № 8
Гурьянов Г.Н. Показатели напряженного состояния, запаса прочности и эффективности формоизменения в зависимости от критериев формы очага деформации при разных моделях упрочнения проволоки № 11
Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М., Егоров В.Д. К разработке прогрессивного производства проволоки и канатов в северном исполнении № 2
Емельянов В.В., Сосенушкин Е.Н. Технические требования и режимы прокатки биметаллических листов для изготовления из них изделий способом ротационной вытяжки № 7
Комаров О.Н., Сапченко И.Г., Жилин С.Г. Технологические особенности процессов прессования термитной смеси для экзотермического переплава № 4
Логинов Ю.Н., Постыляков А.Ю. Влияние натяжения между литейным агрегатом и прокатным станом на напряженное состояние металла № 3
Перетятько В.Н., Сметанин С.В. Исследование напряженного состояния металла при прокатке в четырехвалковых разрезных калибрах № 1
Покрас И.Б., Чикуров Г.А., Касимов М.И. Методика экспериментального исследования процесса волочения в режиме жидкостного трения № 10
Снигирев А.И., Железняк Л.М., Ковин Д.С. Совершенствование волочильного инструмента при использовании альтернативной технологии получения полос из нихрома и ферронихрома № 5
Филиппова М.В., Климов А.В., Перетятько В.Н. Качество мелющих шаров № 12

Материаловедение и новые материалы

Абрамов А.А., Гиршов В.Л., Цеменко В.Н. Анализ современных технологий центробежного распыления металлических порошков № 8
Алсараева К.В., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Изменение при усталости свойств поверхности силумина, подвергнутого электронно-пучковой обработке № 6
Быков Ю.А., Карпухин С.Д. Нанотвердость поверхностного слоя твердых тел № 6
Быков Ю.А., Унчикова М.В., Пахомова С.А., Помельникова А.С., Силаева В.И. Методика выбора материала и технологии термической обработки деталей машиностроения № 8
Васенев В.В., Мироненко В.Н., Бутрим В.Н., Аронин А.С., Аристова И.М., Осинцев О.Е. Разработка технологии получения прессованных полуфабрикатов и штамповок из алюминиевого сплава САС1-50 и изучение их структуры и физико-механических свойств № 9
Конкевич В.Ю., Осинцев О.Е., Бецофен С.Я., Грушин И.А. Исследование влияния основных компонентов и переходных металлов на структуру и свойства быстрозакристаллизованных свариваемых сплавов системы Al—Zn—Mg № 11
Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Лузгин В.И., Фризен В.Э., Шевченко С.Ю. Эволюция микроструктуры литейных алюминиевых сплавов при гидродинамическом воздействии электромагнитных полей на расплав № 7
Кохан Л.С., Шульгин А.В., Пунин В.И. Технологические основы производства слоистых композиционных прямоугольных заготовок из металлических порошков № 3
Курганова Ю.А., Лопатина Ю.А. Анализ распределения армирующей фазы в алюмоматричных композиционных материалах № 4
Малая Е.В., Решенкин А.С., Гончаров Р.А., Воробьев С.С. Свойства порошковых композиционных магнитомягких материалов электротехнического назначения № 5
Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А. Разработка универсальной методики гранулометрического анализа металлических и неметаллических порошковых материалов и изделий из них, тонкой структуры зерен и процессов их агломерации № 12
Пучков Ю.А., Фам Хонг Фу. Построение диаграмм достижения свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов методом торцевой закалки № 3
Пячин С.А., Бурков А.А. Формирование интерметаллидного покрытия электроискровым легированием алюминия титаном № 1

Решенкин А.С., Гончаров А.В., Тихомиров А.Г. Обоснование применения *SN*-распределения для анализа параметров микроструктуры конструкционных сталей № 1

Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Математическая модель процесса получения металлических гранул методом вращающегося электрода с плазменным нагревом № 4

Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств № 2

Унчикова М.В., Костенко Ю.В., Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г. Влияние термической обработки на структуру и свойства интерметаллидного монокристаллического сплава на основе Ni_3Al № 10

Фигуровский Д.К., Терновых А.М., Тронза Е.И., Дергунова Е.А., Роберов И.Г., Матвеев Д.Б. Исследование неоднородности прессованной заготовки для производства сверхпроводниковых стрендов на основе ниобия и олова № 10

Чеэрова М.Н., Комарова Т.В., Дубинский В.Н. Разработка мер по повышению качества пружинной термически обработанной проволоки № 3

Чумаков Е.В. Экспресс-метод оценки длительных механических свойств конструкционных материалов № 5

Информация

Алпеева Е.В., Родионова И.Н., Котельников А.А. Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчета сварных конструкций методом конечных элементов № 2

Гребнев Ю.В., Жаркова В.Ф. Исследование композиционного металлического материала XIX в. № 2

Коробова Н.В., Вишенков М.А., Минаев А.В. Бесштамповые методы формообразования пространственных листовых деталей пластическим деформированием № 11

Лавриненко В.Ю. XII Международная научно-техническая конференция "Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем" в Севастополе № 12

Международная научно-техническая конференция "Современные технологии и оборудование для холодной объемной штамповки" № 1

Пожарский А.В., Кидалов Н.А., Гулевский В.А. Разработка универсальной камерной печи для термической обработки отливок, штамповок и поковок № 1

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2015 г. № 12

Чернышов Е.А., Романов А.Д., Романова Е.А. Развитие материалов для баллистической защиты на основе алюминиевых сплавов № 10

ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство 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 12.10.2015. Подписано в печать 24.11.2015. 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.