ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Том 16 № 5 май 2018

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

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

Зам. главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

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

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

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Федулов В.М., Изотов В.А., Кулик Е.Е., Бессуднов И.А., Вишталюк А.А. Влияние степени заполнения модели на ударную вязкость при FDM-печати литейной оснастки 195
Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Маслов К.А., Романов А.С. Опыт применения магналия в производстве отливок ответственного назначения 198
Михеев Р.С. Инновационные пути в создании антифрикционных композиционных покрытий на основе цветных сплавов с повышенными триботехническими свойствами . . 204

Кузнечно-штамповочное производство

Соков В.И., Крук А.Т., Соков И.И., Крук В.А. Система управления муфтами кривошипных горячештамповочных прессов на базе пневмоголовки У328А 211
Анцифиров А.А., Кривошеин В.А., Зимов Д.В. Совершенствование конструкции гидравлического пресса 221

Прокатно-волочильное производство

Поворов С.В., Егоров Д.В. Исследование процесса формовки детали в виде швеллера путем экспериментального исследования и математического моделирования 225

Материаловедение и новые материалы

Каменская Н.И. Восстановление микроструктуры паропроводных труб из стали 15Х1М1Ф после длительной эксплуатации на ТЭС 229
Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А., Мизера С.В., Балаклейский Н.С., Логинов А.Б. Методика исследования тонкой структуры коллоидно-графитовых пленок на поверхности стальных образцов с различной шероховатостью 235

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.00 – машиностроение и машиноведение; 05.04.00 – энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение; 05.16.00 – металлургия и материаловедение и в базу данных Chemical Abstracts

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2018

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Vol. 16 № 5 May 2018

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

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

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Fedulov V.M., Izotov V.A., Kulik E.E., Bessudnov I.A., Vishtalyuk A.A. Influence of filling degree of model on impact strength at FDM-printing of foundry equipment 195
Leushin I.O., Grachev A.N., Leushina L.I., Maslov K.A., Romanov A.S. Experience of application of magnalium in production of responsible destination castings 198
Mikheev R.S. Innovative ways to produce of antifriction composite coatings based on non-ferrous alloys with enhanced properties 204

Forging and Stamping Production

Sokov V.I., Kruk A.T., Sokov I.I., Kruk V.A. Control system for couplings of crank hot-stamp presses on basis of U328A pneumatic head 211
Antsifirov A.A., Krivoshein V.A., Zimov D.V. Development of hydraulic press design 221

Rolling and Drawing Production

Povorov S.V., Egorov D.V. Study of forming process of channel part through by experimental study and mathematical simulation 225

Physical Metallurgy and New Materials

Kamenskaya N.I. Recovery of microstructure of steam pipes from steel 15Cr1M1V after long-term operation at thermal power plants 229
Petrov A.N., Loginov B.A., Petrov M.A., Mizera S.V., Balakleysky N.S., Loginov A.B. Research into method of fine structure of colloidal-graphite films on surface of steel specimens with different roughness 235

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.00 – mechanical engineering and machine science; 05.04.00 – power, metallurgical and chemical mechanical engineering; 05.16.00 – metallurgy and material science and in Chemical Abstracts database

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

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2018

УДК 621.744

В.М. Федулов, В.А. Изотов, Е.Е. Кулик, И.А. Бессуднов, А.А. Вишталюк
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)

Влияние степени заполнения модели на ударную вязкость при FDM-печати литейной оснастки

Приведены результаты исследований зависимости ударной вязкости от степени заполнения модели при FDM-печати образцов, изготовленных из PLA- и ABS-пластика.

Ключевые слова: 3D-прототипирование; пластик; FDM-технология; ударная вязкость; заполнение.

The studies results of the dependence of impact strength on the filling degree of the model at FDM-printing of specimens from PLA- and ABS-plastic material are presented.

Keywords: 3D-prototyping; plastic material; FDM-technology; impact strength; filling.

Прочность литых пластмасс, используемых в настоящее время на производстве, исследована достаточно обширно. Из различных видов пластика (PLA, ABS, PETG) производят расходные материала для 3D-принтеров в виде калиброванного прутка диметром 1,75 мм. При 3D-печати происходит процесс экструзии пластика через разогретую до температуры 220...260 °С печатающую головку, что приводит к изменению физико-механических свойств исходного материала. Кроме этого, деталь, изготовленная методом 3D-печати, имеет слоистую структуру (каждый слой спаян с предыдущим) и различную настраиваемую степень заполнения внутреннего тела детали. Степень заполнения напрямую определяет прочность изделия и может колебаться от 50 до 100 %. Частичное заполнение позволяет существенно экономить материал и увеличить скорость изготовления детали.

Актуальной проблемой является определение степени заполнения модели при сохранении необходимых прочностных характеристик. В настоящее время 3D-прототипирование применяют и в заготовительном производстве. Детали из пластика можно использовать в качестве пресс-форм и в различной модельной оснастке. Такие детали подвержены многократным силовым и ударным нагрузкам. Поэтому целесообразно провести исследования ударной прочности деталей, изготовленных по FDM-технологии. Эта технология наиболее доступна даже для небольших предприятий, так как цена оборудования и расходных материалов для ее реализации значительно меньше в сравнении с затратами на другие технологии изготовления деталей методами 3D-прототипирования.

ГОСТ 4647—80 соответствует международному стандарту ИСО 179-1—2000, распространяется на большинство видов пластмассы и устанавливает метод определения ударной вязкости по Шарпи на образцах с надрезом и без надреза. Тип образца и надреза предусматривают в нормативно-технической документации на материал.

При отсутствии указаний рекомендуется использовать образец типа 2, надрез типа В.

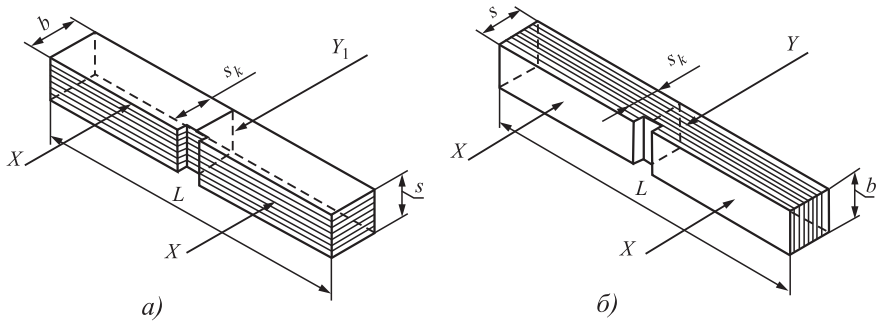


Рис. 1. Образцы для испытания на ударную вязкость параллельно (*а*) и перпендикулярно (*б*) слоям

Образец типа 2 имеет ширину 4 мм, толщину 10 мм и длину 80 мм, при расстоянии между опорами 70 мм. Надрез типа Б должен иметь радиус закругления не более (0,25 ± 0,01) мм. Все изделия, изготовленные на 3D-принтере, имеют слоистую структуру, поэтому необходимо исследовать ударную вязкость в различных направлениях (рис. 1).

Ударную вязкость по Шарпи определяют для следующих материалов: жесткие формовочные термопласты или литьевые, включая наполненные и упрочненные композиции; жесткие листы из термопластов; жесткие формовочные реактопласты, включая слоистые пластики; пластмассы, наполненные волокном (композиты), включая маты, композиты с однонаправленными волокнами, ячеистые пластмассы.

Испытание на удар применимо для образцов, изготовленных из формовочных материалов или готовых изделий и полуфабрикатов (например, из отформованных изделий, слоистых пластиков, экструзионных листов). Это испытание применимо для контроля производства, а также для приемки и отбраковки формовочных материалов и изделий.

Ударную вязкость рассчитывают по формуле

$$a_k = \frac{A_k}{bs_k} \cdot 1000, \qquad (1)$$

где A_k — энергия удара, затраченная на разрушение образца с надрезом, Дж;

b — ширина образца по его середине, мм;

s_k — толщина образца под надрезом, мм.

Особенностью моделей, изготовленных по FDM-технологии, является слоистая структура. Именно этот параметр является одним из ключевых факторов снижения прочности при нагрузке. Становится сложно предугадать зону и характер разрушения. По характеру излома образцов после испытания на ударную вязкость можно судить о неравномерной прочности вдоль слоев при заполнении модели менее 75 % (рис. 2).

При заполнении модели 50 % линия излома образцов имеет значительные отклонения от линии удара копра и концентратора напряжений (см. рис. 2, справа). При увеличении степени заполнения (см. рис. 2, слева) линия излома становится более явной и располагается напротив концентратора напряжений.

1. Результаты испытания образцов из PLA-пластика при ударе параллельно/перпендикулярно структурным слоям

Номер образца	Энергия удара, затраченная на разрушение образца с надрезом, A_k, Дж		
	Заполнение модели		
	50 %	75 %	100 %
1	0,108/0,118	0,127/0,147	0,128/0,167
2	0,098/0,118	0,118/0,137	0,118/0,177
3	0,098/0,128	0,109/0,157	0,147/0,186
4	0,098/0,118	0,118/0,147	0,128/0,177
5	0,088/0,128	0,118/0,157	0,147/0,177
Ударная вязкость a_k, кДж/м^2			
1	3,38/3,2	3,97/3,99	4/4,54
2	3,06/3,2	3,69/3,72	3,69/4,81
3	3,06/3,48	3,41/4,27	4,59/5,05
4	3,06/3,2	3,69/3,99	4/4,81
5	2,75/3,48	3,69/4,27	3,97/4,81
Среднее значение a_k, кДж/м^2	3,06/3,31	3,69/4,05	4,05/4,8

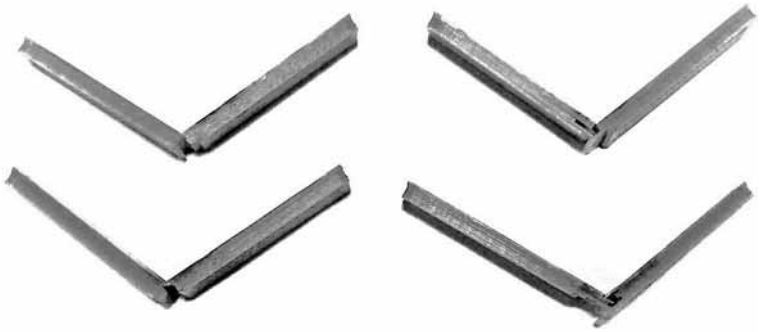


Рис. 2. Характер излома образцов, изготовленных по FDM-технологии, при ударе параллельно слоям

2. Результаты испытания образцов из ABS-пластика при ударе параллельно/перпендикулярно структурным слоям

Номер образца	Энергия удара, затраченная на разрушение образца с надрезом, A_k, Дж		
	Заполнение модели		
	50 %	75 %	100 %
1	0,395/0,456	0,448/0,528	0,466/0,576
2	0,408/0,465	0,436/0,522	0,472/0,580
3	0,395/0,460	0,448/0,522	0,472/0,580
4	0,398/0,456	0,448/0,528	0,466/0,576
5	0,395/0,460	0,442/0,528	0,466/0,580
Ударная вязкость a_k, кДж/м^2			
1	12,34/12,39	14/14,35	14,56/15,65
2	12,75/12,64	13,63/14,18	14,75/15,76
3	12,34/12,5	14/14,18	14,75/15,76
4	12,44/12,39	14/14,35	14,56/15,65
5	12,34/12,5	13,81/14,35	14,56/15,76
Среднее значение a_k, кДж/м^2	12,44/12,48	13,89/14,28	14,64/15,72

Испытания образцов из PLA-пластика на ударную вязкость проводили при нормальных условиях (образцы типа 2, надрез типа B). Площадь сечения в месте удара составляла 32 и 36,8 мм^2 при ударе параллельно и перпендикулярно структурным слоям соответственно. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

При аналогичных испытаниях ударная вязкость образцов, изготовленных из ABS-пластика, значительно выше, чем для образцов из PLA-пластика (табл. 2), что согласуется с известными свойствами этих материалов. Если сравнить результаты испытаний со средними значениями по аналогичным материалам, полученными литьем (табл. 3), то ударная вязкость ABS-пластика ниже на 30 %, а ударная вязкость для PLA-пластика при заполнении модели более 75 % соизмерима с табличными значениями.

3. Свойства ABS- и PLA-пластика

Параметр	ABS	PLA
Плотность, кг/м^3	1,01	1,2...1,25
Температура плавления, °С	220...260	190...220
Индекс текучести расплавленного пластика, г/10 мин	1,43	7,8
Относительное удлинение при разрыве, %	20,86	4,43
Предел прочности при изгибе, МПа	45,44	65,02
Предел текучести, МПа	40,96	26,5
Модуль упругости при изгибе, МПа	1948,45	2504,4
Ударная вязкость, кДж/м^2	22,11	4,28

Выводы

1. При изготовленнии литейной оснастки по FDM-технологии следует учитывать не только степень заполнения, но и тип используемого пластика. Для образцов, изготовленных из PLA-пластика, ударная вязкость значительно снижается при заполнении модели менее 50 %. ABS-пластик даже при максимальной степени заполнения модели имеет ударную вязкость ниже табличных значений. Причиной снижения этого показателя может являться более высокая температура экструзии (плавления) в сравнении с PLA-пластиком.

2. При проектировании оснастки следует уделять внимание направлению действия нагрузки. Желательно выбирать перпендикулярное направление нагрузки относительно структурных слоев изделия. В этом случае ударная вязкость увеличивается от 7 до 15 % как для PLA-, так и для ABS-пластика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина А.А.** Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.

2. **Бабкин О.Э.** 3D макетирование: технологии, оборудование, материалы. СПб.: СПбГУКиТ, 2013. 97 с.

3. **Оценка** возможности применения пластиковых материалов отечественного производства при получении отливок из алюминиевых сплавов / В.А. Изотов, В.М. Федулов, Ю.С. Федулова, В.В. Мусинов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 12. С. 12—15.

4. **Разработка** технологии получения тонкостенных алюминиевых отливок с применением PLA-пластика в качестве материала выплавляемой модели методом литья в песчано-гипсовые формы / В.А. Изотов, А.А. Акутин, А.С. Равочкин, В.М. Федулов, Ю.С. Федулова, А.А. Вишталюк // Литейное производство. 2015. № 5. С. 15—19.

Виталий Михайлович Федулов, канд. техн. наук, fedulov_wit@mail.ru;
Владимир Анатольевич Изотов, д-р техн. наук;
Елизавета Евгеньевна Кулик;
Иван Александрович Бессуднов, канд. техн. наук;
Алексей Александрович Вишталюк

УДК 621.74

И.О. Леушин, А.Н. Грачев, Л.И. Леушина, К.А. Маслов, А.С. Романов
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Опыт применения магналия в производстве отливок ответственного назначения

Изложен опыт применения в производстве отливок ответственного назначения одного из представителей группы магналиев — сплава АМг6л. Сформулированы практические рекомендации по работе с этим материалом.

Ключевые слова: литейный алюминиевый сплав; магналий; отливка ответственного назначения; литейная технология; литье в песчаные формы.

The experience of using in the manufacture of the responsible designation castings of one of the representatives of the magnalium group—alloy AMg6l is considered. Practical recommendations about work with this material are formulated.

Keywords: foundry aluminum alloy; magnalium; casting of responsible destination; foundry technology; sand casting.

Литейные алюминиевые сплавы группы IV (сплавы на основе системы Al—Mg — *магналии*) широко применяют в производстве фасонных отливок. Для них характерны малая плотность и достаточно высокие механические свойства, они хорошо свариваются и обрабатываются резанием.

Сочетание высокой удельной прочности сплавов этой группы и хорошей коррозионной стойкости позволяет использовать их даже в литом состоянии в качестве конструкционных материалов для изготовления деталей ответственного назначения, работающих при средних статических и ударных нагрузках, деталей изделий, работающих в морской воде, а также в условиях влажной атмосферы, поэтому они актуальны, прежде всего, для судо- и авиастроения. При этом уровень рабочих температур при длительной эксплуатации сплавов типа магналий — наиболее низкий среди литейных алюминиевых сплавов и не превышает 80 °С.

Коррозионная стойкость этих сплавов выше, чем у литейных сплавов других систем на основе алюминия (Al—Si, Al—Cu, Al—Zn). Высокая коррозионная стойкость алюминиево-магниевых сплавов в растворах хлористых солей, так же как и в щелочном растворе, обусловлена образованием гидратной пленки, задерживающей коррозионный процесс. Алюминиево-магниевые сплавы длительное время сохраняют чистоту и блеск полированной поверхности.

Недостатки магналиев — пониженные по сравнению с силуминами литейные свойства и герметичность, повышенная склонность к окислению в расплавленном состоянии, к образованию горячих трещин и усадочных рыхлот, взаимодействию с влагой литейных форм, низкая жидкотекучесть.

Характерным представителем этой группы является сплав АМг6л (АЛ23), среднелегированный по магнию. Содержание в нем 6...7 % Mg способствует высокому временному сопротивлению разрыву в литом состоянии. Растворимость магния в твердом алюминии сплава значительна (достигает 15 %) и это обеспечивает высокие механические свойства. Кроме α-твердого раствора магния в алюминии в структуре сплава присутствует β-фаза, представляющая собой хрупкое интерметаллидное соединение Al_3Mg_2.

Некоторые характеристики сплава АМг6л представлены, например, в ГОСТ 1583—93 "Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия".

Сплав АМг6л применяют как после литья, так и после термической обработки (отжиг и закалка). Он может упрочняться в процессе термической обработки по режиму Т4 (гомогенизирующий отжиг и закалка). В закаленном состоянии сплав не склонен к межкристаллитной коррозии, однако в литом состоянии

при воздействии коррозионной среды наблюдается развитие коррозии по границам зерен, что обусловлено наличием в литой структуре избыточной β-фазы по границам зерен, выделяющейся в процессе кристаллизации. Ее образование в структуре сплава снижает сопротивление коррозии, зависящее не только от количества, но и от формы выделения: грубые первичные выделения оказывают более неблагоприятное влияние. Коррозия усиливается в тех местах отливок, где образуется рыхлота, за счет развития межкристаллитной коррозии.

Примеси меди, железа и кремния снижают пластические свойства сплава, образуя химические соединения, выделяющиеся по границам зерен. Главной вредной примесью для магналиев, снижающей уровень механических свойств, является кремний. В соответствии с ГОСТ 1583—93 в сплаве АМг6л содержание кремния не должно превышать 0,2 %. Это ограничивает возможность использования для производства данного сплава лома и отходов алюминиевых сплавов, что снизило бы себестоимость его производства.

Сплав АМг6л имеет широкий интервал кристаллизации $t_{лик}$ = 620 °С, $t_{сол}$ = 450 °С, низкую жидкотекучесть, линейную усадку 1,1 %; при литье в металлические формы склонен к горячим трещинам, к образованию усадочной пористости и ликвации. Также он обладает высокой склонностью к газонасыщению (особенно водородом) и образованию газовой и газоусадочной пористости [1—8].

В этой связи становится понятным, почему производство фасонного литья ответственного назначения из сплава АМг6л требует повышенного внимания со стороны технологов и цехового персонала.

Авторами статьи согласно техническому заданию одного из предприятий Приволжского федерального округа проведен комплекс мероприятий по обеспечению качества выпускаемого фасонного литья из сплава АМг6л.

На первом этапе проводили технологический аудит литейного цеха предприятия. Оценивали потенциал имеющегося технологического оборудования, необходимость его модернизации, анализировали список поставщиков материалов, варианты логистического обеспечения будущего выпуска отливок, а также характеристики действующей системы менеджмента качества выпускаемого литья. В итоге была подтверждена принципиальная возможность выполнения заказа без существенных издержек на подготовку производства.

На втором этапе работ детально анализировали применяемый в цехе процесс изготовления магналия с учетом его специфики. Последовательно рассматривали традиционные операции и переходы: подготовку шихты; плавку; рафинирование, модифицирование и дегазацию расплава; изготовление и заполнение литейных форм; финишные операции. Особое внимание уделяли сравнительной оценке использования различных способов литья для производства заготовок из сплава АМг6л. По результатам был сформирован подробный перечень мероприятий и профилактических мер, которые необходимо было учитывать далее.

Некоторые из них приведены ниже.

Подготовка шихты. Подготовка шихтовых материалов — ответственный этап получения качественных отливок из сплава АМг6л, так как загрязненность шихты (масло, влага, продукты коррозии и др.) не только наследуется отливками, но часто вообще не может быть устранена даже самыми эффективными методами рафинирования. Неметаллические включения не только сами образуют дефекты в отливках, но и затрудняют фильтрационное питание отливок на фронте кристаллизации, увеличивая количество дефектов газоусадочного характера.

Шихтовые материалы должны быть обязательно очищены, просушены и перед введением в сплав нагреты до температуры 150...200 °С. При использовании очищенной и просушенной шихты снижение неметаллических включений в результате продувки аргоном через пористую керамику составляет 50...60 %.

Многократный переплав возврата без освежения шихты первичными металлами может привести к загрязнению сплава вредными примесями и снижению его механических свойств. Увеличение числа переплавов (100 % возврата) отрицательно влияет на содержание легирующих компонентов. Больше других элементов выгорает магний. Наиболее опасно при многократных переплавах повышение содержания примеси железа, количество которого в сплаве после четвертого переплава возрастает в 1,6 раза. Снижение механических свойств происходит в основном из-за загрязнения

сплава включениями и роста газонасыщенности. Изучение влияния отходов собственного производства на механические свойства сплава показало допустимость использования не более 40...50 % возврата. При этом применение возврата и отходов собственного производства, значительно пораженных коррозией, нежелательно.

Основными шихтовыми материалами при плавке АМг6л являются: первичные алюминий и магний в чушках, химический состав и основные условия поставки которых устанавливаются ГОСТами и техническими условиями. Поверхность чушковых материалов должна быть чистой, без неслитин, шлаковых и других включений. Компоненты — добавки титана, циркония, бериллия готовятся в виде лигатур (промежуточных сплавов), состоящих из основного компонента рабочего сплава с одним или двумя легирующими компонентами. В составе шихты масса лигатур составляет от 30 до 70 %.

Основные требования к двойным лигатурам:

1) отсутствие неметаллических включений;

2) равномерное распределение второго элемента по всему объему лигатуры.

Наиболее эффективные способы очистки шихты от грязи, следов масла, краски — пескоструйная обработка и травление.

Плавка. Необходимость защиты магналиев в процессе плавки вызывается их высокой химической активностью. Расплав предохраняют от окисления и насыщения водородом ведением плавки в вакууме, атмосфере инертных газов, в воздушной среде, содержащей фториды, применением покровных флюсов при плавке в слабо окислительной атмосфере, защитным легированием.

Химический состав сплава в значительной мере определяется его склонностью к окислению и образованию газовых пор в отливках. Наиболее сильно окисляются магналии, содержащие более 1 % Mg. Именно к ним относится сплав АМг6л. Пористая, рыхлая пленка MgO не способна предохранить расплав от контакта с окружающей средой. Для защиты сплава от окисления применяют защитные флюсы и легирование беррилием (0,01...0,05 % Be). Последнее резко снижает окисляемость сплава благодаря образованию бериллиево-магниевой оксидной пленки.

Повышения чистоты алюминиевых сплавов достигают тщательной подготовкой шихтовых материалов, защитой поверхности расплава от контакта с окружающей средой, рафинированием сплавов от неметаллических включений. Содержание оксидных включений и растворенных газов в алюминиевых расплавах возрастает по мере увеличения времени выдержки в плавильных и раздаточных печах. Особенно вредна выдержка во влажной атмосфере. Максимальная скорость плавки и минимальная длительность выдержки расплавов в печи перед разливкой способствуют повышению их чистоты.

Рост зерна компенсируется введением титана. Комплексное легирование магналия малыми добавками бериллия, титана и циркония способствует улучшению его механических и литейных свойств в результате уменьшения эффективного интервала их кристаллизации.

Для футеровки печей используют графит, шамот или высокоглиноземистые материалы.

Плавку можно вести в топливных или электрических печах.

Индукционные тигельные печи промышленной или средней частоты используют в крупносерийном производстве. Однако следует учитывать, что в связи с высокой электропроводностью алюминия их электрический КПД ниже, чем при плавке железоуглеродистых сплавов.

Индукционные канальные печи позволяют создать максимально благоприятные условия для плавки алюминия при низком расходе электроэнергии на плавку. Однако в процессе плавки алюминия на стенках канала печи откладывается тугоплавкий оксид алюминия, что приводит к необходимости очищать канал от нароста каждые 3—4 плавки.

Нагревательные элементы электрических печей сопротивления из хромоникелевых сплавов обеспечивают температуру в рабочем пространстве печи не выше 1100 °С, а керамические — не выше 1300 °С. При этом продолжительность плавки алюминия составляет 2,5...4,5 ч. Как следствие, в связи с низкой производительностью печи сопротивления при плавке магналиев главным образом выполняют функции раздаточных.

Топливные печи используют для плавки при небольших объемах производства. Это тигельные печи с чугунным тиглем, обогреваемые газом или мазутом.

Широкое распространение получил инструмент из титана и его сплавов. Такой инструмент не загрязняет сплавы вредными примесями, обладает хорошей стойкостью и малой плотностью, благодаря чему облегчается труд плавильщика. Инструмент изготовляют из листовых или прутковых отходов титановых сплавов обычным способом, но часто его делают составным: рабочую часть, соприкасающуюся с жидким металлом, — из титана, а все остальное — из малоуглеродистой стали или деформируемых алюминиевых сплавов.

Графитовые тигли предварительно должны быть высушены и прокалены. Их сушку необходимо проводить при температуре 600 °С не менее 6 ч, прокаливание — при 100...1100 °С не менее 2 ч. Во избежание загрязнения сплава железом при плавке в чугунном тигле его внутренние стенки предварительно покрывают огнеупорной краской. Эти материалы перемешивают с водой до сметанообразного состояния и наносят кистью тонким слоем на тигель, разогретый до 100...120 °С.

Важен температурный режим плавки, порядок загрузки шихтовых материалов и введения отдельных компонентов сплава, последовательность технологических операций металлургической обработки расплава. Плавку всегда проводят в предварительно разогретой печи, температура в которой должна быть на 100...200 °С выше температуры плавления основного компонента сплава.

Положительное влияние на структуру и свойства отливок оказывает применение "предварительного" сплава, или "болота".

Наиболее эффективным способом рафинирования является вакуумирование. Вследствие того, что часть магния растворяется в результате испарения, вакуумирование проводят до введения магния и компенсируют его угар из возврата. При вакуумировании сплав, подогретый до температуры 720...740 °С, выдерживают в вакуумной камере в течение 10...15 мин при давлении 1,0...10 мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = = 133,322 Па). Необходимый вакуум должен достигаться в течение 1...2 мин. Хорошей очистки сплавов от неметаллических включений можно достичь при их обработке хлористым марганцем в количестве 0,05...0,1 % массы шихты (температура рафинирования 690...710 °С), а также при продувке сухим аргоном при температуре 730 °С, 10...15 мин. Продувка азотом нецелесообразна, так как при этом образуется твердый нерастворимый нитрид магния, загрязняющий расплав.

Хороший эффект дегазации достигается применением комбинированных методов рафинирования, например, сочетание вакуумирования и адсорбционного метода дегазации (флюсом или солями), вакуумирования и ультразвуковой обработки. Предварительная обработка расплава хлористой солью способствует зарождению большого количества пузырьков растворенного водорода, однако их рост и всплывание замедлены, что требует последующей выдержки расплава перед заливкой в формы. Применение вакуумирования после обработки солью способствует быстрому росту пузырьков и их интенсивному выделению.

При ультразвуковой обработке расплава наряду с рафинированием происходит дробление взвешенных примесей и модифицирующих добавок, что способствует повышению механических свойств сплавов благодаря увеличению числа центров кристаллизации.

Изготовление форм и заливка. Предприятием в качестве рабочего метода выбран метод литья в песчаные формы.

Для него заливку проводят короткой непрерывной струей. Во время заливки придерживают счищалкой окисные пленки и случайные остатки шлака и флюса, находящиеся на поверхности расплавленного металла. Литниковая чаша во время заливки должна быть полной. Разрыв струи металла не допускается.

Температура заливаемого сплава оказывает существенное влияние на получение отливок необходимого качества. Во всех случаях она должна быть минимальной, но достаточной для четкого заполнения форм и получения качественных отливок без спаев (неслитин). Исключение составляют тонкостенные отливки, для получения которых требуется более высокая температура.

Повышенная температура сплава при заливке приводит к серьезным, иногда непоправимым последствиям: увеличивается пористость отливок; усиливается неблагоприятное химическое воздействие сплавов на чугунные тигли раздаточных печей, в результате чего сплавы, особенно алюминиевые, насыщаются железом, превышая его предельное содержание, регламентируемое ГОСТ; литейные формы быстрее разрушаются, что обуслов-

ливается излишним загрязнением сплава неметаллическими включениями; длительное пребывание сплава в раздаточной печи при высокой температуре сопровождается его более интенсивным окислением с образованием окисных пленок, попадающих в сплав, огрублением структуры и снижением качества отливок; резко повышается окончательный брак по трещинам, усадочным дефектам, газовой пористости, неметаллическим включениям и другим дефектам.

При литье в песчаные формы до 50 % затрачиваемого труда приходится на изготовление форм и стержней и до 50 % дефектов литья в той или иной степени связано с материалом формы.

Для получения высококачественных отливок формовочные и стержневые смеси должны иметь:

- хорошую текучесть, т.е. способность легко заполнять углубления и выступы на моделях, способность принимать под давлением любую форму и сохранять ее;
- ограниченную влажность (не более 3...4 %);
- податливость, т.е. способность уменьшаться в объеме под действием усадки остывающей отливки;
- необходимую прочность и газопроницаемость в сыром и сухом состояниях;
- минимальную газотворную способность;
- малую склонность к объемным изменениям при нагреве;
- долговечность, выбиваемость и низкую стоимость изготовления.

Для изготовления песчаных форм используют формовочные и стержневые смеси, изготовленные из кварцевых и глинистых песков, формовочных глин, связующих и вспомогательных материалов.

Высокая газопроницаемость смеси способствует быстрому удалению из полости формы воздуха, а также паров и газов, выделяющихся из нее при заливке. Недостаточная газопроницаемость может привести к образованию в отливке наружных и внутренних газовых раковин и незаливов. Для предотвращения горения металла при литье магналиев в формовочную смесь следует вводить защитную присадку.

Магналии кристаллизуются в широком интервале температур. Большая разница в концентрациях твердой и жидкой фаз приводит к быстрому разветвлению растущих дендритов в определенных кристаллографических направлениях. Однако вследствие изменения состава жидкости они не могут утолщаться. В результате получаются сильно разветвленные тонкие дендриты, между осями которых остаются участки незакристаллизовавшейся жидкости. Это вызывает образование рассеянной усадочной пористости, так как питание оставшейся жидкостью почти полностью изолированных участков затруднено. Отливки из сплавов этого типа испытывают усадочные напряжения, вызванные линейной усадкой, еще в полужидком состоянии, когда прочность сплавов мала.

При разработке технологии литья из магналиев следует применять рассредоточенный подвод металла в полость формы во избежание перегрева ее отдельных участков. Не рекомендуется простановка массивных высоких прибылей, так как эффект пропитки ими рассеянной усадочной пористости и рыхлости незначителен. Наиболее выгодные условия кристаллизации создаются при таком тепловом режиме формы, который обеспечивает последовательно направленную кристаллизацию благодаря применению холодильников, а также ярусных и вертикально-щелевых литниковых систем. Это позволяет получать плотные отливки с высокими механическими свойствами.

На завершающем этапе работы с учетом возможностей предприятия ему были даны рекомендации по работе со сплавом АМг6л, наиболее важные из которых следующие:

1. Максимальное сокращение времени процесса плавки для предотвращения окисления и насыщения металла газами; защитное легирование бериллием.

2. Использование в металлозавалке не более 40...50 % возврата. В случае использования возврата обязательная очистка шихты от грязи, следов масла, краски травлением. Загрязненную шихту подают в травильную ванну с раствором едкого натра (концентрация 40...50 г/л, температура 50...60 °С) и выдерживают 1,5...3,0 мин. Потом шихту промывают в ванне с горячей проточной водой, подают для "осветления" в ванну с раствором азотной кислоты (концентрация 150...200 г/л) и выдерживают в ней 1...2 мин. Затем шихту промывают в горячей воде и сушат.

3. Загрузка шихты в разогретую печь, температура в которой должна быть на 100...200 °С выше температуры плавления основного компонента сплава во избежание контакта с влагой футеровки печи или с влагой, входящей в состав тигельных красок.

4. Ограничение содержания влаги в формовочных смесях (4...5 %).

5. Введение в состав формовочной и стержневой смесей противопригарной защитной присадки (4...6 % вакуумного масла или 5...6 % борной кислоты) для предотвращения горения металла. Допустим ввод борной кислоты не в состав стержневой смеси, а путем опрыскивания сырых стержней ее 2...3%-ным водным раствором.

На основе сформулированных рекомендаций были разработаны технологические инструкции на все переделы производственного процесса получения литых заготовок из сплава АМг6л.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В.** Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение, 1984. 432 с.
2. **Гаврилюк В.П., Кулинич А.А., Рябинина Е.А.** Влияние кремния на структуру и механические свойства сплава АМг6л после литья в кокиль // Процессы литья. 2010. № 3 (81). С. 58—63.
3. **Золоторевский В.С.** Структура и прочность литых алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1981. 191 с.
4. **Литейное** производство / Ф.М. Михайлов, Б.В. Бауман, Б.Н. Благов и др.; под ред. А.М. Михайлова. М.: Машиностроение, 1987. 156 с.
5. **Побежимов П.П., Нефедова Л.П., Белов Е.В.** Металлургия коррозионно-стойких алюминиевых сплавов и отливок. М.: Металлургия, 1989. 150 с.
6. **Производство** отливок из сплавов цветных металлов / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов и др.; под ред. В.Д. Белова. М.: Изд. дом МИСиС, 2011. 615 с.
7. **Трухов А.П., Маляров А.И.** Литейные сплавы и плавка. М.: Академия, 2004. 336 с.
8. **Цветное** литье: справочник / Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.; под ред. Н.М. Галдина. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.

Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук,
igoleu@mail.ru;
Александр Николаевич Грачев, канд. техн. наук;
Любовь Игоревна Леушина, канд. техн. наук;
Константин Александрович Маслов, канд. техн. наук;
Антон Сергеевич Романов

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

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

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

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

УДК 621.893

Р.С. Михеев
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Инновационные пути в создании антифрикционных композиционных покрытий на основе цветных сплавов с повышенными триботехническими свойствами

Предложены инновационные пути создания антифрикционных покрытий из композиционных материалов (КМ) на основе цветных металлов с применением процессов дуговой наплавки и модифицирующей обработки. Исследования композиционных покрытий на основе алюминия и олова показали, что в результате комплексного выбора составов КМ, технологий изготовления наплавочных материалов и параметров режимов синтеза покрытий возможно получать функционально-градиентные слоистые композиции, обладающие заданными триботехническими свойствами.

Ключевые слова: покрытия; композиционные материалы; цветные сплавы; жидкофазное совмещение; износостойкость; коэффициент трения.

The arc welding and surface treatment processes are proposed as innovative ways of creating of antifriction coatings from composite materials based on non-ferrous alloys. Investigations of composite coatings based on aluminum and tin showed that due to complex choice of composite materials compositions, manufacturing techniques for filler materials and parameters of coatings synthesis modes, it is possible to obtain functionally graded layered compositions having specified tribotechnical properties.

Keywords: coatings; composite materials; non-ferrous alloys; liquid-phase combining; wear resistance; friction coefficient.

Введение. Приобретающая в последнее время все большую актуальность проблема энергосбережения и повышения энергетической эффективности неразрывно связана с надежностью и работоспособностью машин и механизмов, которые обеспечиваются преимущественно безотказным функционированием узлов трения или трибосопряжений [1].

Характеристики трибосопряжений во многом определяются применяемыми антифрикционными материалами, в качестве которых используют сплавы на основе алюминия, меди, олова или свинца, уровень служебных свойств которых достиг предельных значений, а потенциал их дальнейшего совершенствования за счет легирования или специальной обработки себя исчерпал [1, 2].

Единственным эффективным решением указанной проблемы является применение принципиально новых функционально-градиентных слоистых композиций с покрытиями из дисперсно-наполненных *композиционных материалов* (КМ). Гетерогенность последних способствует расширению области существования во фрикционном контакте вторичных структур, обеспечивающих нормальное протекание процессов трения и изнашивания в широком диапазоне параметров трибонагружения.

Многообразие форм КМ позволяет путем подбора составов, изменения соотношения компонентов и выбора процессов получения покрытий направленно регулировать основные триботехнические характеристики и снижать стоимость изделий из антифрикционных материалов [2—5].

Выбор вариантов получения композиционных покрытий. Технологические процессы изготовления функционально-градиентных слоистых композиций с рабочими покрытиями из КМ могут быть разделены на три группы [5]:

1) твердофазные методы (например, прокатка пакетов из материала матрицы и КМ, сварка взрывом, термомеханическая обработка поверхностного слоя КМ);

2) жидкофазные методы (например, центробежное литье, дуговая, лазерная, плазменная наплавка, модифицирующая обработка оплавлением);

3) методы нанесения покрытий из газовой фазы.

Однако большинство из них требуют сложного, дорогостоящего и специального оборудования. Наиболее экономичными и перспективными для применения в промышленности по критериям производительности, универсальности, уровня внедрения и доступности являются способы создания функционально-градиентных слоистых композиций процессами дуговой наплавки, позволяющие благодаря послойному синтезу осуществлять формирование необходимой структуры и заданных свойств покрытий из КМ.

Другой перспективный метод направленного изменения структуры и свойств поверхностных слоев гетерофазных материалов — модифицирующая обработка поверхности готовых изделий высококонцентрированными потоками энергии (лучом лазера, плазмой и др.).

Дополнительной особенностью указанных методов является возможность в результате правильного выбора температурно-временных характеристик (температура нагрева, время выдержки при данной температуре), введения легирующих элементов или применения промежуточных переходных слоев обеспечить необходимый уровень смачивания и ограничить химическое взаимодействие между наполнителем, матрицей и материалом подложки, т.е. решить важную проблему термодинамической и кинетической совместимости компонентов КМ [4—6].

Наплавочные композиционные материалы. Внедрение дуговых процессов нанесения покрытий из КМ при изготовлении функционально-градиентных слоистых композиций до недавнего времени было ограничено отсутствием соответствующих наплавочных материалов. В настоящее время удается изготовить и опробовать КМ, удовлетворяющие основным требованиям к наплавочным материалам:

- качественное формирование наплавленного покрытия при сохранении и равномерном распределении в нем упрочняющих частиц;
- отсутствие деградации наполнителя в процессе наплавки;
- отсутствие дефектов в наплавленном покрытии.

КМ на основе алюминия или олова характеризуются не только высоким уровнем триботехнических свойств, но и достаточной технологичностью [5, 7]. Это позволяет получать из них жидкофазными методами и методами порошковой металлургии наплавочные материалы в форме соответствующих ГОСТ 21449 прутков для реализации на стандартном сварочном оборудовании процессов дуговой наплавки в автоматическом или ручном режиме, что особенно ценно при проведении восстановительных ремонтных операций (рис. 1).

Литейная технология изготовления наплавочных материалов из КМ на основе алюминия обеспечивает однородность распределения армирующих частиц, отсутствие интенсивного межфазного взаимодействия и загрязнений на границе раздела частица/матрица (см. рис. 1, *б*). Для достижения требуемого качества формирования композиционных покрытий в составе подобных материалов должно содержаться не

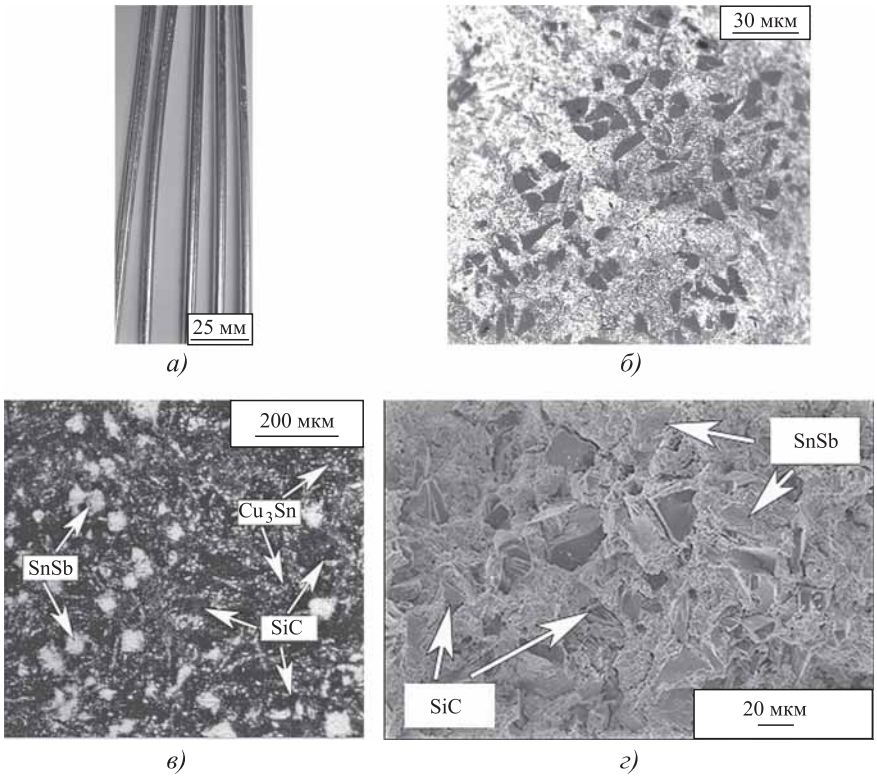


Рис. 1. Внешний вид (*а*, *б*), микроструктура (*в*) и изломы (*г*) наплавочных прутков из различных КМ [5, 7]:

а, *б* — АК12М2МгН + 10 % $SiC_{(14)}$; *в*, *г* — Б83 + 5 % $SiC_{(40)}$ + 0,25 % $B_4C_{(<1)}$

более 10 % мас. наполнителя минимального размера (14 мкм) и 11...13 % мас. кремния. Поэтому в качестве матричного сплава для получения композиционных наплавочных прутков рекомендуется литейный сплав АК12М2МгН, широко применяемый в промышленности [5].

Для введения и обеспечения равномерного распределения в оловосодержащей матрице плохо смачивающихся наполнителей и модифицирующих добавок различного типа и фракционного состава разработана и впервые опробована технология, состоящая из последовательных стадий: механического легирования и холодного прессования порошковой композиционной смеси; спекания и горячей экструзии порошковой формовки [7]. Изготовленные таким образом прутки из КМ на основе сплава Б83 характеризуются достаточной сплошностью при массовой доле наполнителя не более 5 % (рис. 1, *в*, *г*).

Нанесение покрытий из композиционных материалов. Для формирования качественных покрытий и обеспечения равномерного распределения наполнителя при отсутствии его деградации важно выбрать оптимальные схемы и определить технологические параметры процессов наплавки.

Исследования вариантов схем ведения процесса наплавки, отличающихся температурно-временным воздействием на наплавочный материал, позволили установить, что композиционные прутки следует вводить в головную часть сварочной ванны (по переднему фронту) (рис. 2, *а*) [5]. Достигаемые при этом максимальные значения температуры нагрева расплава и длительности пребывания в нем наполнителя приводят к повышению жидкотекучести и формированию валиков с однородным распределением наполнителя (рис. 2, *в*, *г*).

Технологические параметры режима *дуговой наплавки КМ на основе алюминия*, выбранные по критериям минимальной степени проплавления подложки из сплава АМг3 по ГОСТ 4784, сохранения заданного кода армирования и качественного формирования валиков (сварочный ток 150...160 А; напряжение на дуге 18...20 В; скорость наплавки 7...12 м/ч; расход защитного газа (аргона) 12...15 л/мин), позволяют получать за один проход покрытия толщиной 2,5...3,0 мм, которые кристаллизуются эпитаксиально и, как следствие, обладают высоким уровнем адгезионной прочности (рис. 2, *д*) [8].

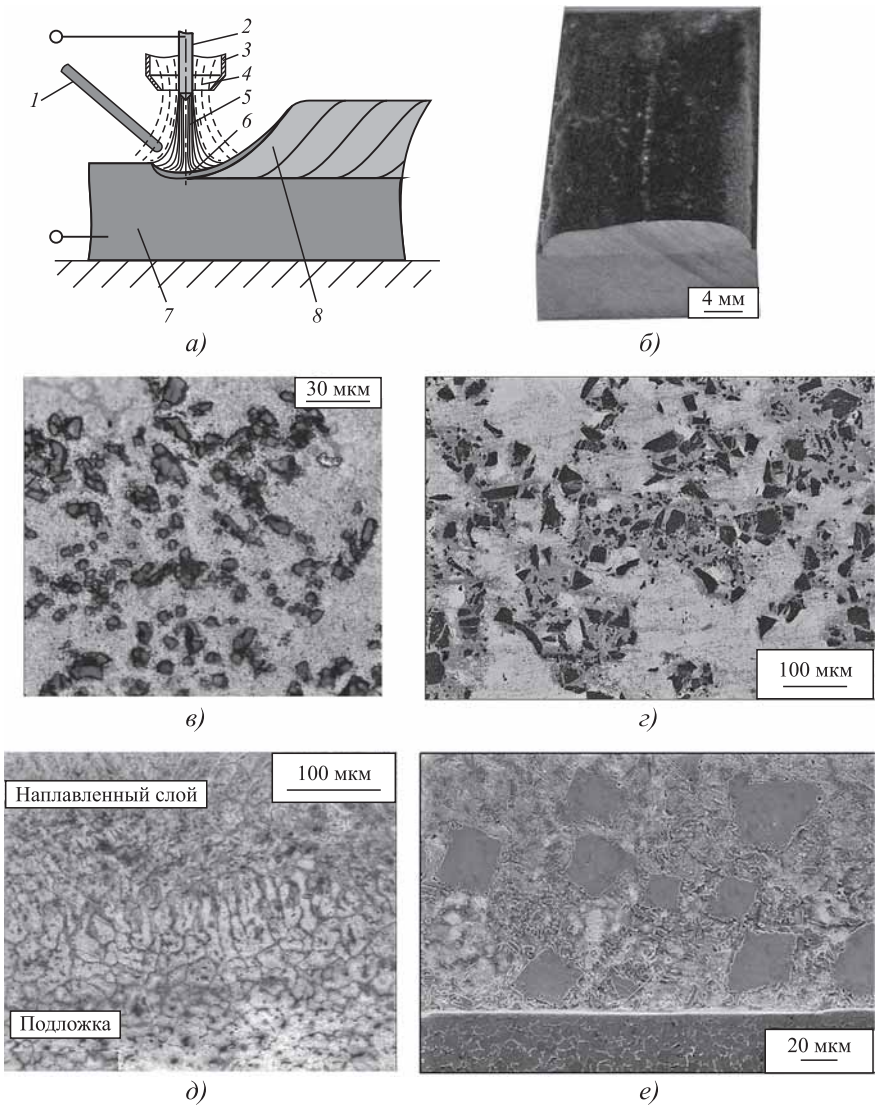


Рис. 2. Схема процесса дуговой наплавки (*а*), внешний вид (*б*), микроструктура в центральной части (*в*, *г*) и по линии сплавления (*д*, *е*) покрытий из различных КМ:

а — *1* — наплавочный пруток; *2* — неплавящийся электрод; *3* — сварочная горелка; *4* — защитный газ; *5* — электрическая дуга; *6* — сварочная ванна; *7* — подложка; *8* — наплавленный слой; *б*, *г*, *е* — Б83 + 5 % $SiC_{(40)}$ + + 0,25 % $B_4C_{(<1)}$; *в*, *д* — АК12М2МгН + 10 % $SiC_{(14)}$

Установленные схему и режимы процесса дуговой наплавки можно применять для формирования аналогичных по составу покрытий на основаниях из низкоуглеродистой стали, что позволит получать востребованные в узлах трения биметаллические композиции. Однако в таких случаях для обеспечения максимального уровня адгезионной прочности и предотвращения образования сплошного интерметаллидного слоя следует ограничивать термическое воздействие электрической дуги на границу раздела сталь—алюминий за счет применения промежуточного алюминиевого слоя [6].

Покрытия из КМ на основе олова характеризуются гладкой поверхностью с плавным переходом к металлу стальной подложки и имеют толщину каждого слоя 2,0...3,0 мм после механической обработки, необходимой для выравнивания рабочей поверхности. Предварительное лужение поверхности стальной подложки (Ст3сп по ГОСТ 380) обеспечивало повышение жидкотекучести при формировании композиционных покрытий за счет образования промежуточного слоя из чистого олова толщиной не более 0,5 мм. Определены технологические параметры процесса дуговой наплавки КМ на основе олова (сварочный ток 40...60 А; напряжение на дуге 16...18 В; скорость наплавки 7...12 м/ч; расход защитного газа (аргона) 12...15 л/мин), обеспечивающие стабильность фазового состава и структуры, отсутствие выгорания легирующих элементов и минимальное перемешивание основного и наплавленного металла (рис. 2, *е*) [9].

Триботехнические свойства наплавленных покрытий. Испытания наплавленных покрытий, проведенные на установках МТУ-01 и CERT UMT Multi-Specimen Test System в условиях сухого трения скольжения по схеме трибоконтакта "втулка по диску" при скорости скольжения 0,39 м/с, показали целесообразность замены традиционных антифрикционных материалов.

По сравнению с антифрикционным сплавом АОМ 20-1, который при удельных давлениях более 0,46 МПа переходит в задир, сформированные покрытия из КМ на основе алюминия характеризуются расширенным диапазоном трибонагружения и обладают в 2—3 раза меньшими значениями интенсивности и коэффициента изнашивания *K* (рис. 3).

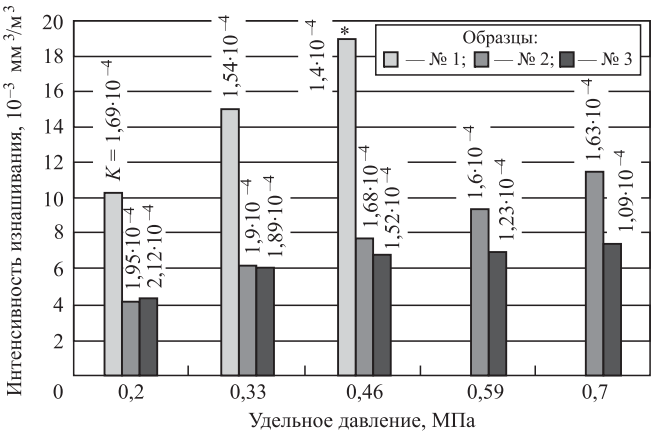


Рис. 3. Интенсивность и коэффициент изнашивания образцов из различных материалов в зависимости от удельного давления:

№ 1 — литой АОМ 20-1; № 2 — покрытие АК12М2МгН + + 5 % $SiC_{(14)}$; № 3 — покрытие АК12М2МгН + 10 % $SiC_{(14)}$; * — переход в задир

Увеличение количества армирующих частиц в покрытиях уменьшает долю матрицы в поверхности трения, что снижает опасность задира и способствует снижению нагрузки на каждую частицу в отдельности при выполнении ими функции поддерживающих элементов на контактной поверхности. Таким образом, увеличивается износостойкость, что особенно заметно при удельных давлениях более 0,46 МПа, и существенно расширяется диапазон допустимых параметров трибонагружения (удельных давлений, скоростей скольжения и длительности нагружения).

Анализ изменений значений коэффициента трения, интенсивности изнашивания и коэффициента стабильности в зависимости от удельного давления показывает целесообразность не только модифицирования структуры покрытий из сплавов на основе олова (например, Б83) субмикронными частицами, но и введения крупных высокопрочных частиц для достижения оптимального сочетания триботехнических характеристик.

Субмикронные частицы (например, бор или карбид бора) вследствие диспергирования структуры мягкой пластичной основы (α-фаза) и интерметаллидных фаз Sn—Sb и формирования из продуктов износа КМ и контртела мелкодисперсных промежуточных слоев способствуют повышению износостойкости на 35 и 30 % (интенсивность изнашивания снижается с $2{,}62 \cdot 10^{-5}$ до $1{,}71 \cdot 10^{-5}$ и $1{,}77 \cdot 10^{-5}$ г/м соответственно), а также уменьшению значений

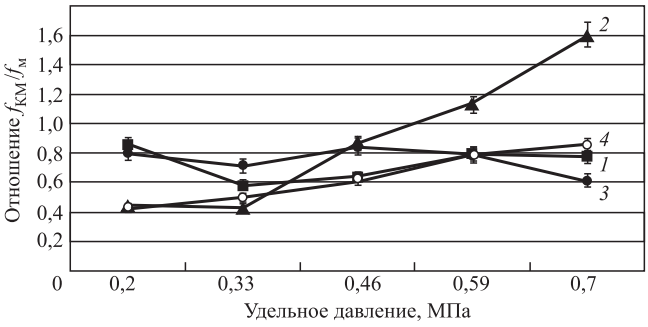


Рис. 4. Отношение коэффициентов трения наплавленных покрытий из КМ $f_{КМ}$ и покрытия из баббита Б83 $f_м$ в зависимости от удельного давления:

1 — Б83 + 0,25 % $B_{(<0,5)}$; *2* — Б83 + 0,25 % $B_4C_{(<1)}$; *3* — Б83 + 5 % $SiC_{(40)}$; *4* — Б83 + 5 % $SiC_{(40)}$ + 0,25 % $B_4C_{(<1)}$

коэффициента трения на 40...60 % по сравнению с покрытиями из антифрикционного сплава Б83 (рис. 4).

Наибольший эффект от присутствия субмикронных частиц достигается при малых удельных давлениях (до 0,33 МПа). Керамические частицы микронного размера являются на поверхности трения опорами, ограничивающими пластическую деформацию и препятствующими механическому уносу материала матрицы в процессе трения, и обеспечивают увеличение износостойкости на 30 % и уменьшение коэффициента трения на 30...40 %, особенно при удельных давлениях свыше 0,46 МПа [9].

Комплексные исследования рельефа и состава поверхностей трения, морфологии продуктов изнашивания позволили определить, что изнашивание наплавленных композиционных покрытий происходит по абразивному и окислительному механизмам, свойственным соответственно начальной и установившейся стадиям режима трения.

После испытаний при максимальных удельных давлениях 0,7 МПа на достаточно гладких поверхностях трения образцов образуются полосы пластического деформирования и очаги схватывания, характеризующиеся фрагментированностью и малой площадью в сравнении с образцами из антифрикционных сплавов (рис. 5, *а*, *б*, *в*).

В полосах пластического деформирования на стадии установившегося изнашивания образуются вторичные ячеистые структуры размером 5...10 мкм, оконтуренные керамическими частицами средним размером 1 мкм, позволяющие минимизировать разрушение поверхностных слоев и экранировать недопустимые процессы схватывания. Причем минимально выраженными полосами пластического деформирования, а также наибольшей площадью, занятой шаржированной механической смесью из состава образующегося в процессе трения переходного слоя, характеризуются поверхности трения полиармированных композиционных покрытий. В продуктах изнашивания преобладают мелкие (до 10 мкм) частицы равноосной формы, образующиеся в результате износа по окислительному механизму (см. рис. 5, *г*) [5, 9].

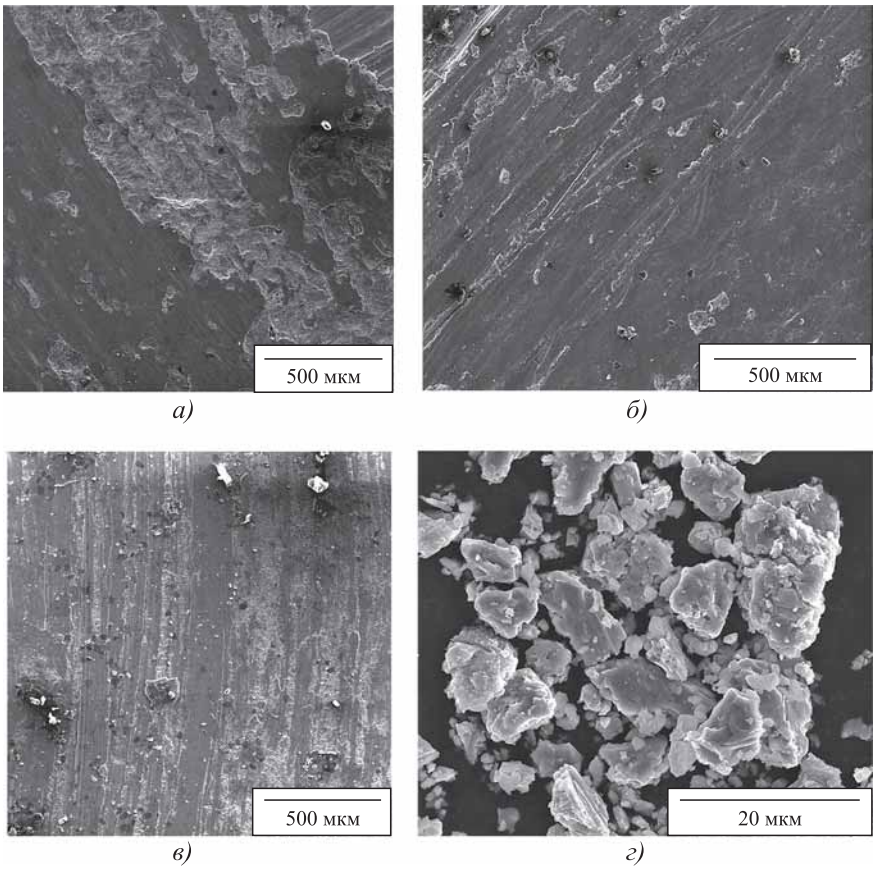


Рис. 5. Поверхности трения (*а*—*в*) и продукты изнашивания (*г*) покрытий из различных материалов после испытаний при удельном давлении 0,7 МПа:

а — Б83; *б*, *г* — АК12М2МгН + 5 % $SiC_{(14)}$; *в* — Б83 + 5 % $SiC_{(40)}$ + 0,25 % $B_4C_{(<1)}$

Значения коэффициента стабильности, характеризующего уровень вибраций и шума достигаемые при трении, составляют для сформированных покрытий не менее 0,8 в широком диапазоне трибонагружения (удельное давление 0,2...3,3 МПа; окружная скорость скольжения 0,39...1,0 м/с), что связано с повышением твердости вследствие диспергирования структуры матричного сплава при наплавке [8]. Это позволяет рекомендовать разработанные материалы для применения в узлах трения ответственных машин и механизмов с высокой напряженностью работы, к числу которых относятся подшипники и вкладыши подшипников скольжения паровых и газовых турбин, судовых мало- и среднегабаритных дизелей.

Модифицирующая обработка поверхности композиционных материалов. Дополнительным резервом в повышении эксплуатационных свойств изделий из КМ является модифицирующая обработка их поверхности высококонцентрированными источниками энергии.

Изменение технологических параметров режимов обработки предоставляет широкие возможности при локальном характере теплового воздействия на материал, регулирования скоростей нагрева и обеспечения высоких скоростей охлаждения в результате теплоотвода во внутренние слои образца, влияния на структуру и, следовательно, на свойства гетерогенных материалов.

В работе [5] показана возможность увеличения на порядок дисперсности структуры матрицы (см. таблицу) без деградации армирующего наполнителя на отличающихся друг от друга по уровню прочности, типу, размеру и доли наполнителя образцах из изотропных алюмоматричных КМ, изготовленных по литейной технологии.

В качестве источников энергии, которые благодаря своей простоте и экономичности могут быть легко встроены в существующий на предприятиях технологический цикл производства изделий, предложена электрическая дуга, горящая в магнитном поле. Отмечено, что после модифицирующей обработки микроструктура КМ, содержащих углерод в форме графита, вследствие взаимодействия углерода с кислородом характеризуется значительной пористостью, что не позволяет проводить обработку таких материалов высококонцентрированными источниками энергии. Результатом модифицирующей обработки является повышение износостойкости поверхностных слоев в 1,5—2 раза, снижение коэффициента изнашивания на 20...30 % при сохранении исходных значений коэффициента трения (см. таблицу).

Таким образом, присутствие в составе разработанных и сформированных покрытий из КМ на основе сплавов алюминия и олова тугоплавких армирующих частиц микронного и субмикронного размеров позволяет в результате влияния на размеры образующихся интерметаллидных фаз и дисперсность элементов литой структуры покрытий, а также за счет влияния на межфазное взаимодействие по поверхностям раздела между интерметаллидами, армирующими частицами и матричным расплавом обеспечить нормальное протекание в установившемся режиме процессов трения и износа в широком диапазоне параметров трибонагружения, т.е. решить важную задачу увеличения ресурса работы покрытий, особенно при повышенных трибонагрузках.

Влияние модифицирующей обработки на характеристики образцов из различных материалов [5]

Материал образца	Среднее значение дендритного параметра, мкм/ интенсивность изнашивания*, 10^{-3} мм^3/м/ коэффициент изнашивания*, 10^{-4}		
	Исходное состояние	После обработки	
		B = 0,048 Тл	B = 0,12 Тл
АК9	40/14,2/1,42	5,5/8,1/0,92	6,5/9,3/1,08
АК12 + 2 % Mg + 10 % $Al_2O_{3(40)}$	17,5/8,4/0,97	3,5/7,1/0,93	3,5/6,3/0,84
АК12М2МгН + 12 % $SiC_{(14)}$	22,5/8,8/1,29	4,5/5,1/0,81	4,5/5,2/0,84

* Режимы испытаний на трение и износ: схема «втулка по диску»; удельное давление 0,6 МПа; скорость скольжения 0,39 м/с; длительность 10 мин.

Обозначение. B — магнитная индукция.

Заключение. В качестве инновационных методов синтеза функционально-градиентных слоистых композиций предложены процессы дуговой наплавки, а также модифицирующей обработки поверхности изотропных материалов высококонцентрированными источниками энергии.

Исследованы существующие наплавочные материалы из КМ на основе алюминия и олова и показаны схемы и технологические параметры режимов дуговой наплавки, обеспечивающие получение покрытий, обладающих композиционной структурой с заданной долей армирования, удовлетворительным распределением наполнителя и повышенными триботехническими характеристиками (увеличение износостойкости до 3 раз, снижение коэффициента трения на 60 % по сравнению с традиционными антифрикционными сплавами АОМ 20-1 и Б83).

Определены составы литых КМ и покрытий из них, пригодные для модифицирования, схемы и технологические параметры процессов получения функционально-градиентных композиций, обеспечивающие сохранение наполнителя в матрице и позволяющие увеличить твердость поверхностных слоев на 20...40 %, износостойкость в 1,5—2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Погодаев Л.И., Кузьмин А.А., Лопырев Ю.К.** Надежность судового оборудования. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. 124 с.

2. **Development** and testing of Al-SiC and Al-TiC composite materials for application in friction units of oil-production equipment / T.A. Chernyshova, R.S. Mikheev, I.E. Kalashnikov, I.V. Akimov, E.I. Kharlamov // Inorganic materials: Applied research. 2011. Vol. 2. № 3. P. 322—329.

3. **Михеев Р.С., Чернышова Т.А.** Дискретно армированные композиционные материалы системы Al—TiC (обзор) // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 11. С. 44—53.

4. **Калашников И.Е.** Исследование структуры и свойств алюмоматричных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными частицами // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 8. С. 27—36.

5. **Михеев Р.С., Чернышова Т.А.** Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники. М.: Маска, 2013. 356 с.

6. **Ковалев В.В.** Разработка технологических основ нанесения алюмоматричного композиционного материала на сегмент упорного подшипника скольжения: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 155 с.

7. **Получение** наплавочных прутков из антифрикционного композиционного материала на основе баббита Б83 методом экструзии / И.Е. Калашников, Л.К. Болотова, И.В. Катин, Л.И. Кобелева, А.Г. Колмаков, Р.С. Михеев, Н.В. Коберник // Перспективные материалы. 2016. № 9. С. 70—77.

8. **Получение** поверхностных износостойких структур на основе композиционных материалов / Р.С. Михеев, Н.В. Коберник, В.В. Ковалев // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 4. С. 35—45.

9. **Применение** наплавочных прутков из композиционных материалов на основе баббита Б83 для получения антифрикционных покрытий методом дуговой наплавки / Р.С. Михеев, Н.В. Коберник, И.Е. Калашников, Л.К. Болотова, П.А. Быков, Л.И. Кобелева, А.Г. Колмаков // Перспективные материалы. 2017. № 2. С. 51—59.

Роман Сергеевич Михеев, канд. техн. наук,
mikheev.roman@mail.ru

УДК 621.979.134.001.573—134. 064.004

В.И. Соков *(ОАО "Тяжмехпресс", г. Воронеж),*
А.Т. Крук *(Воронежский государственный технический университет),*
И.И. Соков *(ЗАО "Современная машиностроительная компания", г. Москва),*
В.А. Крук *(НПФ "Мехпресс", г. Воронеж)*

Система управления муфтами кривошипных горячештамповочных прессов на базе пневмоголовки У328А

Рассмотрены общая циклограмма пневмоуправления кривошипными горячештамповочными прессами, пневмоголовка безударного включения и ускоренного выхлопа муфт, математический алгоритм, описывающий работу пневмоголовки совместно с муфтой, на базе которого разработана программа расчета процессов, происходящих при включении и отключении муфт. Проведено сравнение расчетных процессов срабатывания с реально полученными осциллограммами.

Ключевые слова: кривошипные горячештамповочные прессы; муфта и тормоз пресса; безударное включение; пневмоголовка.

The crank hot forming presses pneumatic control general sequence diagram, pneumatic head for the clutches shockless switching-in and accelerated exhaust, mathematical algorithm describing the pneumatic head operation together with the clutch, on the basis of which is developed program of calculation of the processes happening at the clutches switching-in and switching-out are considered. Comparison of the estimated processes of functioning with really received oscillograms is carried out.

Keywords: crank hot forming presses; press clutch and brake; shockless switching-in; pneumatic head.

Общие вопросы и циклограмма срабатывания

Процессам включения и отключения муфт и тормозов кривошипных прессов посвящено достаточное количество работ. В статье освещены дополнительно некоторые вопросы этих процессов при работе, в частности, кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП), которые от других прессов отличаются повышенной частотой ходов ползуна и установкой муфт и тормозов, как правило, на эксцентриковом валу, где номинальный момент муфт, определяемый параметрами выполняемой технологической операции, в разы больше момента, возникающего при включении.

Большие объемы пневмополостей муфт и тормозов КГШП и быстроходность прессов данного типа, а для срабатывания аппаратуры включения и отключения требуется определенное время, влияют на число рабочих одиночных ходов, а в отдельных случаях не обеспечивают нормальную работу пресса.

Цикл кривошипного пресса, работающего в режиме "одиночный ход" (рис. 1), состоит из времени срабатывания электропневмоаппаратуры перед началом разгона рабочего механизма пресса, этапа разгона рабочего механизма, этапа выполнения технологической операции и торможения с остановкой ползуна в крайнем верхнем положении (КВП) с отклонением не более ±10°.

Включение. При включении пресса на очередной ход (см. рис. 1) необходимо выполнение одного важного условия: включение муфты (смыкание фрикционных дисков муфты) должно быть только при разомкнутых дисках тормоза. Для этого на подвижном поршне тормоза устанавливают конечный выключатель, через контакты которого запитываются исполнительные элементы включения муфты.

Обозначения на рис. 1 для 1-й схемы — последовательное включение:

$t_2^{\text{т}}$, $t_2^{\text{м}}$ — время от подачи электросигнала на катушки пневмораспределителя до начала увеличения давления воздуха в рабочих полостях тормоза и муфты;

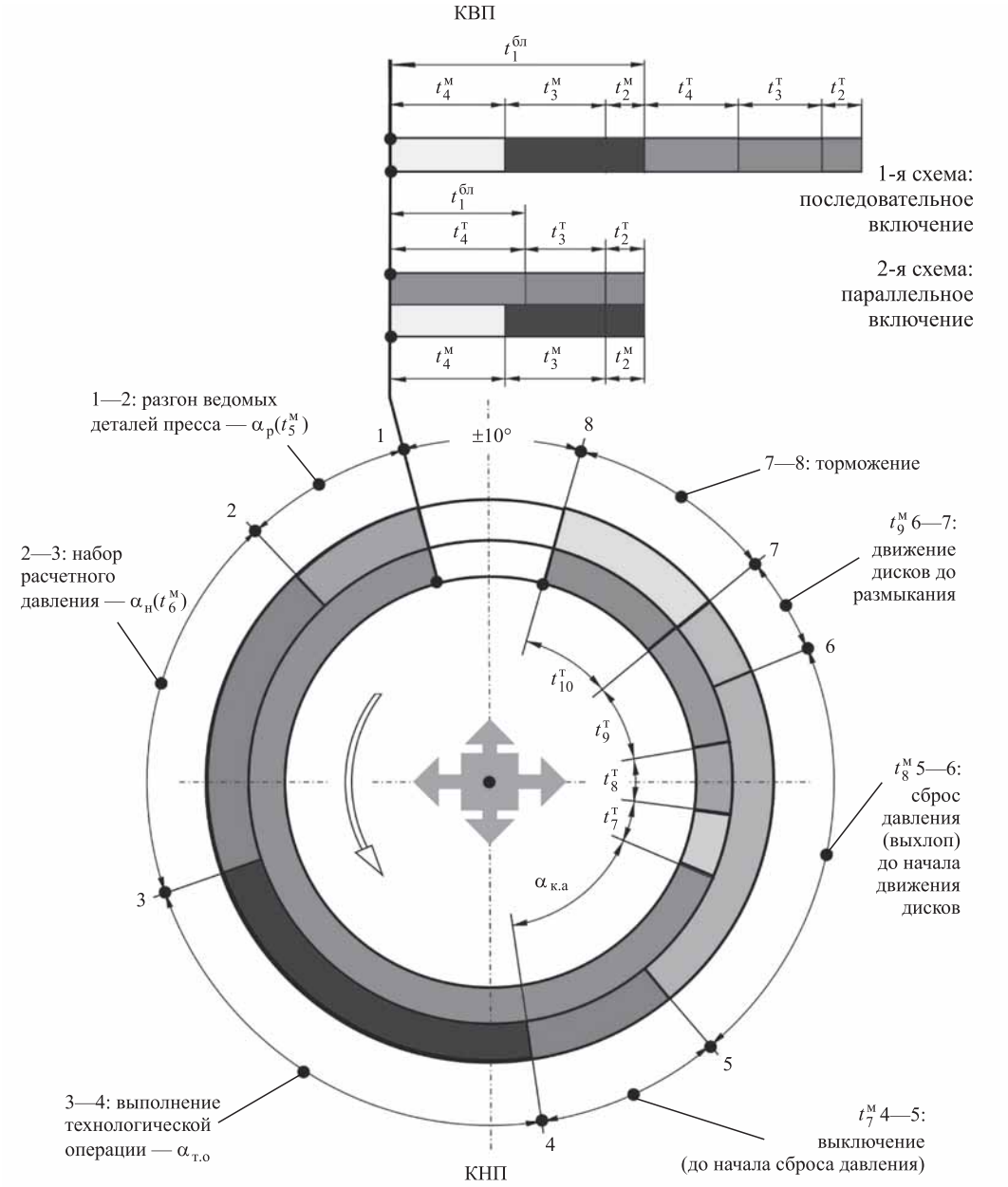


Рис. 1. Типовая циклограмма настройки командоаппарата кривошипного пресса:
1...8 — точки предельных значений при построении циклограммы для конкретного КГШП

$t_3^т$, $t_3^м$ — время нарастания давления в рабочей полости до начала движения дисков тормоза при растормаживании и до начала движения дисков муфты;

$t_4^т$, $t_4^м$ — время движения дисков тормоза при растормаживании (до начала подачи электросигнала на включение муфты) и время движения дисков муфты при смыкании до начала разгона ведомых частей пресса;

$t_1^{бл}$ — время разрыва между размыканием дисков тормоза и смыканием дисков муфты (время блокировки).

Суммарное значение составляющих времени включения тормоза и муфты, находясь за пределами кинематического машинного времени, увеличивает время одиночного хода и ограничивает производительность пресса.

Для КГШП, учитывая, что давление при движении дисков муфты меньше (30...75 кПа) [Расчет муфт, тормозов, трубопроводов и систем пневмоуправления кузнечно-прессовых машин. Москва—Воронеж: ЭНИКМАШ, 1971. 172 с.], чем давление при движении дисков тормоза (250...350 кПа) и то, что на КГШП

предусмотрена обязательная установка дросселя в системе подачи воздуха на муфту для обеспечения плавного безударного включения муфты, допустимо применение 2-й схемы включения — параллельное включение (см. рис. 1), позволяющей включение пневмораспределителей муфты и тормоза одновременно.

Поскольку и в этом случае обеспечивается необходимый разрыв $\left(t_1^{бл}\right)$ между размыканием дисков тормоза и смыканием дисков муфты, время цикла значительно уменьшается и можно повысить число используемых одиночных ходов. Однако при этом снижается гарантия надежности по сравнению с последовательным отключением тормоза и включением муфты, что может приводить к перегреву электродвигателя, а также к повышенному нагреву тормоза и, как следствие, к более быстрому износу фрикционного материала.

Разгон и технологическая операция. Смыкание дисков муфты после включения по 1-й и 2-й схемам сопровождается разгоном находящихся до этого времени в покое исполнительных элементов пресса на угле $\alpha_р\left(t_4^м\right)$.

Увеличение числа используемых одиночных ходов при работе прессов приводило к интенсификации процессов при перемещении дисков муфты и при разгоне исполнительных элементов пресса. Это приводило к большим динамическим нагрузкам, скалыванию и разбиванию фрикционных накладок муфты, как результат ударных осевых нагрузок, при большей скорости перемещения дисков, и разрушению ведомых (чугунных) дисков муфты и срезанию шлицевых зубьев на них, как результат интенсивного приложения разгоняющего момента увеличенного значения [1].

Потребовалось снижать интенсивность процессов включения, но одновременно обеспечивать быстрый набор расчетного давления воздуха в рабочей полости муфты, чтобы к началу выполнения технологического процесса обеспечивать необходимый максимальный крутящий момент, получаемый исходя из рекомендуемого расчетного графика технологического нагружения.

Таким образом, необходим двухступенчатый процесс включения, обеспечивающий плавное безударное осевое перемещение дисков, сниженную интенсивность разгона ведомых частей на угле поворота эксцентрикового вала $\alpha_р$, требуемый по времени набор рабочего давления в пневмополости муфты на угле поворота $\alpha_н$ $\left(t_4^м\right)$ примерно за 40...50° до крайнего нижнего положения ползуна (КНП) пресса, строго перед выполнением технологической операции, соответствующей углу поворота кривошипа $\alpha_{т.о}$ [А.с. 235514 СССР. Устройство для включения пневмо-фрикционных муфт прессов / И.Н. Филькин, М.М. Розенблат, В.И. Соков, В.Н. Качурин. 1969. Бюл. № 5].

Отключение. После выполнения технологической операции при прохождении ползуном обратной части хода от КНП и до КВП на угле поворота эксцентрикового вала (180 + 10)° необходимо осуществить сначала расцепление дисков муфты, а затем начать торможение с остановом ползуна в КВП в пределах угла ±10°.

Это чисто машинное время, в которое должны уложиться по времени все этапы цикла, исполняемые последовательно в процессе отключения муфты и включения тормоза:

$\alpha_{к.а}$ — разница углов настройки командоаппарата на отключение пневмораспределителей муфты и тормоза;

$t_7^м$, $t_7^т$ — время от снятия электрического сигнала с электромагнитов пневмораспределителей муфты до начала сброса давления из полости муфты и с электромагнитов пневмораспределителя тормоза до начала падения давления в полости тормоза;

$t_8^м$, $t_8^т$ — время падения давления в полости муфты до начала расцепления дисков (начало движения дисков) и в полости тормоза до начала движения дисков тормоза на смыкание;

$t_9^м$, $t_9^т$ — время движения дисков муфты и перемещения дисков тормоза от начала движения до смыкания;

$t_{10}^м$, $t_{10}^т$ — время торможения.

При этом надо обеспечить обязательный разрыв по времени и углу поворота кривошипа между началом расцепления дисков муфты и началом сцепления дисков тормоза и обязательный останов ползуна в КВП в требуемом угле (не более ±10°).

Эта циклограмма (см. рис. 1) справедлива для всех типов кривошипных прессов, в том числе и для КГШП, при одном условии: временные характеристики применяемой пневмоаппаратуры должны соответствовать машинному времени быстроходных прессов на пути ползуна от КНП до КВП, т.е. после выполнения технологической операции.

Таким образом, при работе КГШП в режиме "одиночный ход" на процессы включения и отключения муфты и тормоза накладывается ряд следующих условий:

1) быстродействие процессов на каждом из этапов, необходимое для получения максимальной производительности (числа одиночных ходов);

2) минимизация динамических воздействий на элементы пресса;

3) обеспечение необходимого расчетного момента на муфте ко времени начала технологической операции или ко времени возникновения максимального технологического момента на эксцентриковом валу;

4) обеспечение выхлопа воздуха из муфты и тормоза за время обратного хода ползуна после выполнения технологической операции с условием остановки его в КВП (с отклонением ±10°) и угол торможения около 40°.

Первое и третье условия противоречат второму условию. При быстродействии возрастают динамические явления. В связи с этим возникла необходимость создать двухступенчатые системы включения для КГШП: на *первой ступени* включения муфты подача воздуха происходит через трубопровод, с вмонтированным в него дросселем (подбирается по сечению проходного отверстия для каждого пресса), для снижения скорости осевого перемещения нажимного диска до значения, гарантирующего безударное смыкание дисков муфты (0,03...0,04 м/с), и уменьшение скорости нарастания момента при разгоне ведомых частей пресса для снижения его максимального значения, а на *второй ступени* включения, уже через полное сечение выбранного по расчету трубопровода и пневмоаппаратуры для обеспечения заполнения пневмополости муфты расчетным давлением воздуха к необходимому времени по углу поворота кривошипа.

Особое значение имеет обеспечение быстрого выхлопа воздуха из полостей муфты и тормоза за отрезок машинного времени, ограничиваемый временем перемещения ползуна из КНП после выполнения технологической операции до КВП, особенно для КГШП с числом непрерывных ходов в минуту 60...100 (прессы 6,3...25 МН).

Для выполнения этих требований была создана воздухоподводящая пневмоголовка мод. У328А.

Воздухоподводящая пневмоголовка двухступенчатого включения и ускоренного выхлопа У328А

Общий вид пневмоголовки приведен на рис. 2, встраивание пневмоголовки в пневмосхему управления муфтой пресса показано на рис. 3, а все основные конструктивные элементы пневмоголовки — на рис. 4.

Подача воздуха после включения сдвоенного пневмораспределителя У7126А в приемную

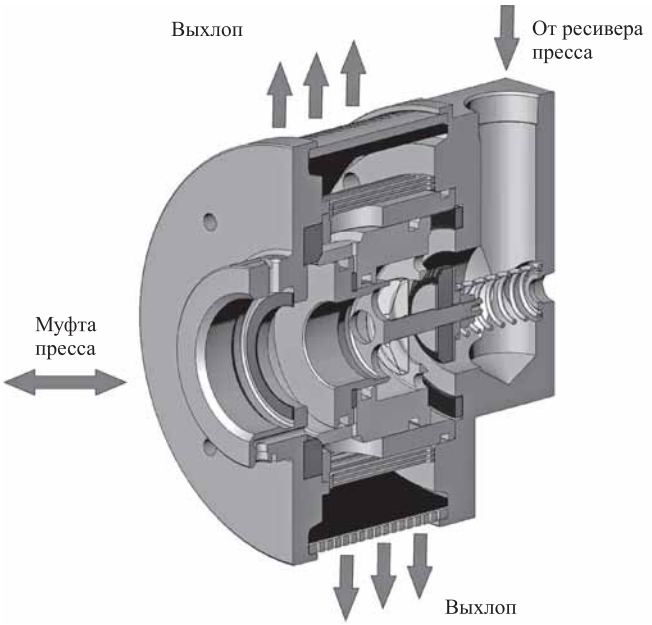


Рис. 2. Конструкция пневмоголовки безударного включения и ускоренного выхлопа У328А для муфт кривошипных прессов

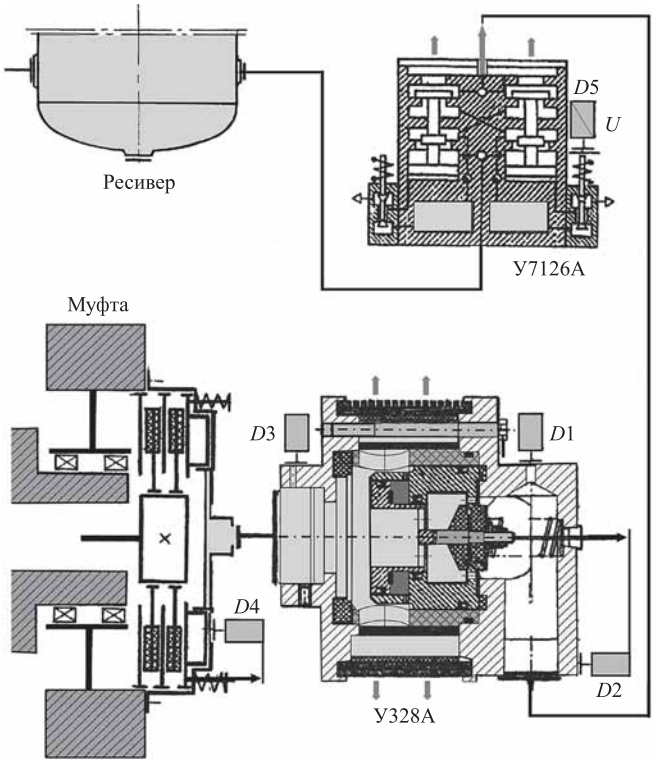


Рис. 3. Пневматическая схема включения-отключения муфты КГШП на базе воздухоподводящей головки У328А и сдвоенного пневмораспределителя У7126А и схема расположения датчиков для экспериментального исследования:

*D*1, *D*3 — датчики давления воздуха в полости наполнения и полости муфты; *D*2, *D*4 — пластинчатые датчики перемещения поршня клапана головки и поршня муфты; *D*5 — регистратор включения электромагнита пневмораспределителя У7126А

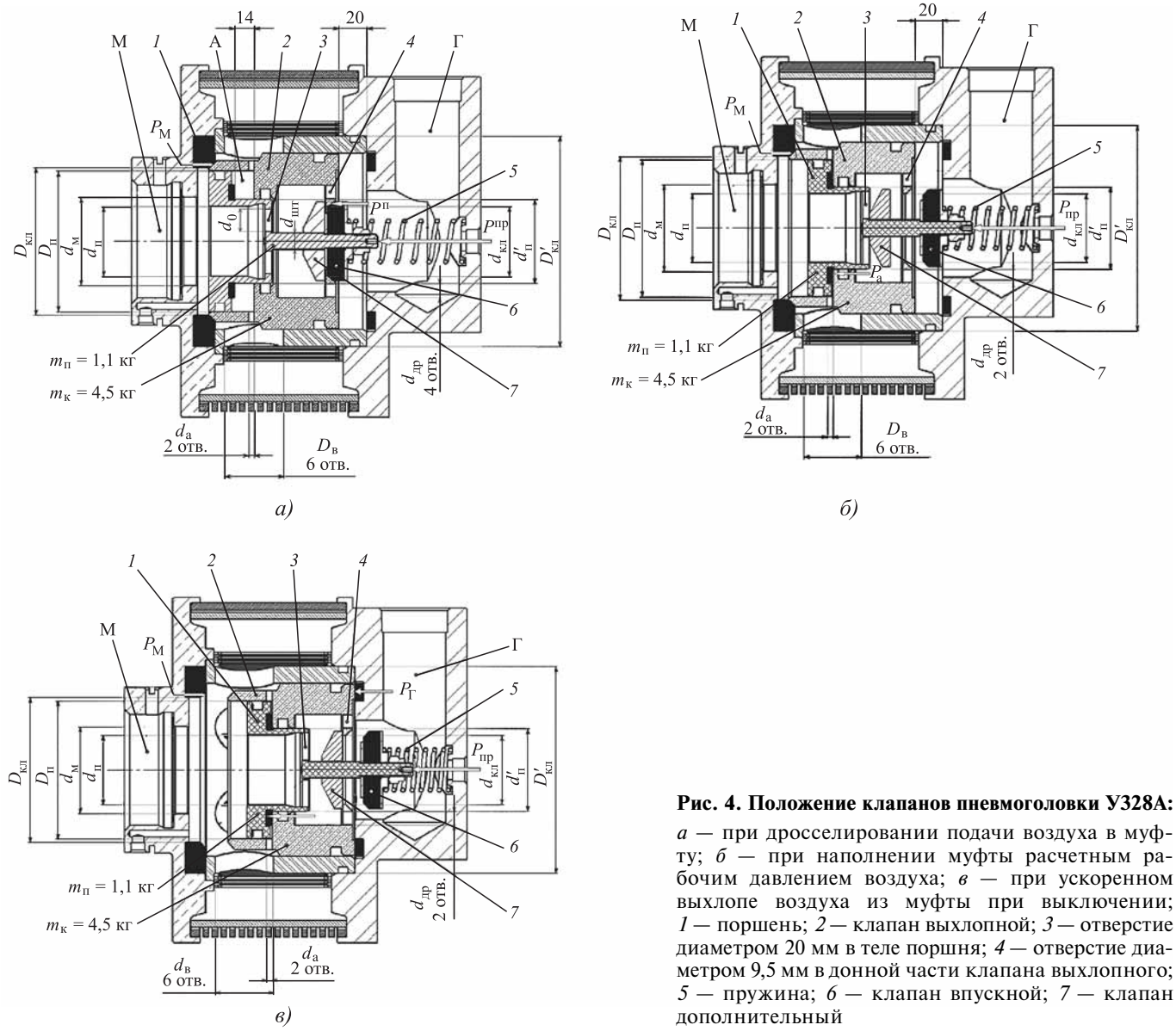


Рис. 4. Положение клапанов пневмоголовки У328А:
а — при дросселировании подачи воздуха в муфту; *б* — при наполнении муфты расчетным рабочим давлением воздуха; *в* — при ускоренном выхлопе воздуха из муфты при выключении; *1* — поршень; *2* — клапан выхлопной; *3* — отверстие диаметром 20 мм в теле поршня; *4* — отверстие диаметром 9,5 мм в донной части клапана выхлопного; *5* — пружина; *6* — клапан впускной; *7* — клапан дополнительный

полость пневмоголовки У328А (см. рис. 3) сопровождается закрытием клапана *2*, если он еще не успел закрыться от силы пружины *5*, и заполнением полости муфты через два отверстия *4* для дросселирования диаметром 9,5 мм в дне клапана *2* и четыре отверстия *3* для свободного прохода воздуха в теле поршня *1*, при этом впускной клапан *6* закрыт.

В этом положении происходит заполнение полости муфты на *первой ступени*.

При достижении в полости муфты давления 150 кПа (1,5 кгс/см^2) поршень *1* перемещается относительно клапана *2*, открывая впускной клапан *6* в донной части клапана *2*, осуществляя включение *второй ступени* заполнения полости муфты.

Недостатком этой системы включения является нерегулируемый порог срабатывания второй ступени, равный 150 кПа. В отдельных случаях, как например, на некоторых моделях КГШП номинальной силой 25 МН, полный разгон ведомых частей не успевал закончиться и в результате в конце разгона происходил некоторый, иногда достаточно большой, скачок момента за счет интенсивного нарастания давления воздуха [1].

Экспериментальные исследования системы включения КГШП номинальной силой 16 МН с воздухоподводящей головкой У328А позволили улучшить временные характеристики пресса по частоте ходов ползуна: 27 одиночных хода ползуна пресса в минуту при 85 непрерывных, а на прессе номинальной силой 6,3 МН — 52 одиночных хода при 100 непрерывных [1].

Осциллограмма (рис. 5) получена при работе пресса номинальной силой 16 МН в режиме

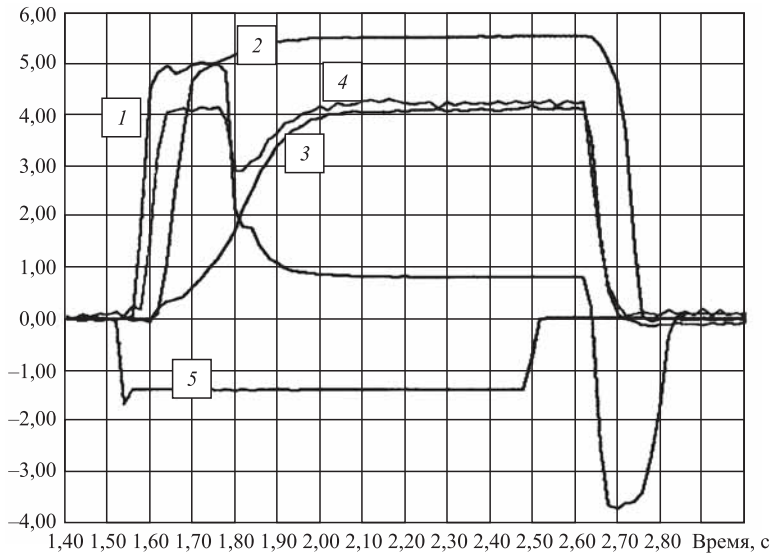


Рис. 5. Осциллограмма процессов при включении-отключении пневмоголовки У328А на прессе КГ8042 номинальной силой 16 МН в режиме "наладка":

1 — ход клапана *2* пневмоголовки, М1:4, мм; *2* — ход поршня муфты, мм; *3* — давление воздуха в муфте, кгс/см^2 (100 кПа); *4* — давление воздуха в полости "Г" пневмоголовки, кгс/см^2 (100 кПа); *5* — электрический сигнал на включение муфты

"одиночный ход", при установке на нем пневмоголовки У328А в соответствии со схемой (см. рис. 3), где клапанный механизм находится в положении после выхлопа (см. рис. 4, *а*) для исходного конструктивного варианта (пружина *5* создает в этом положении силу 15...20 Н): в этом положении выхлопной клапан *2* открыт, клапан впускной (клапан наполнения) *6* закрыт. На рис. 3 показаны места установки пневмодатчиков для записи давления воздуха: в полости "Г" (датчик *D*1) и полости "М" (датчик *D*3), пластинчатых датчиков перемещения поршня *1* пневмоголовки (датчик *D*2) и поршня муфты (датчик *D*4), регистратор включения электромагнита пневмораспределителя У7124А (датчик *D*5).

Подача электросигнала на включение пневмораспределителя У7126А (см. рис. 5, кривая *5*) сопровождается нарастанием давления в полости пневмоголовки "Г" (см. рис. 5, кривая *4*), что приводит к совместному перемещению поршня *1* и клапана *2* пневмоголовки на величину полного хода (см. рис. 5, кривая *1*), закрытию выхлопного отверстия из муфты, нарастанию давления в полости муфты "М" до 30...40 кПа (см. рис. 5, кривая *3*), перемещению поршня и нажимного диска муфты при этом давлении (см. рис. 5, кривая *2*).

В полости "Г" головки в это время давление поддерживается постоянным и близким к максимальному 400 кПа. По окончании хода поршня муфты давление в полости "М" начинает нарастать и по достижении 150 кПа поршень пневмоголовки *1* начинает движение в обратную сторону относительно клапана *2*. Ход поршня составляет 14 мм. И на это значение открывается впускной клапан *6*, позволяя обеспечивать быстрое заполнение полости муфты "М" при уже сомкнутых дисках. В полости пневмоголовки "Г" давление сначала немного падает, потом выравнивается с давлением в полости "М". Заполнением полости муфты "М" давлением расчетной величины заканчивается процесс включения муфты.

Отключение муфты осуществляется после снятия напряжения с электромагнитов пневмораспределителя У7126А с последующим падением давления в полости "Г" (см. рис. 5, кривая *4*) и в полости "М" муфты (см. рис. 5, кривая *3*) и открытием выхлопного клапана *2*, который перемещается относительно корпуса головки на 20 мм в обратную сторону совместно с поршнем *1* и открытым впускным клапаном *6*.

Расцепление дисков муфты осуществляется только при минимальном давлении ниже 30...40 кПа и после этого закрывается впускной клапан *6*. Выхлопной клапан *2* остается в открытом положении, как показано на рис. 3.

Осциллограмма (см. рис. 5) показывает удовлетворительные временные параметры процессов при включении и существенное сокращение времени в процессе отключения, что обеспечивает более простую и гибкую настройку командоаппарата.

Сложность для учета всех факторов, в той или иной зависимости влияющих на процессы включения и отключения в системе управления муфтой и тормозом на КГШП, предопределило необходимость разработки математической программы совместной работы воздухоподводящей пневмоголовки У328А в комплекте с пневмораспределителем У7126А и муфтой пресса в целях изучения и оптимизации переходных процессов ее работы и влияния силы возвратной пружины на стабильность работы головки и всей пневмосистемы, включая работу муфты.

В исходном варианте сила возвратной пружины при закрытом клапане *2* составляла не более 15 Н при жесткости 26 Н/см. После отладки на прессе номинальной силой 6,3 МН сила пружины была принята равной 70 Н при жесткости 76 Н/см (это позволило к началу следующего хода гарантированно закрывать выхлопной клапан из муфты, что стабили-

зировало подготовку следующего включения муфты и позволило получить на данном прессе 52 одиночных хода при 100 непрерывных).

Принципиальная расчетная схема и основные конструктивные параметры пневмоголовки У328А в исходном положении приведены на рис. 4 (это положение определяется остаточным нажатием пружины *5*, предусматривающем закрытие клапана выхлопного *2* после окончания выхлопа воздуха предыдущего хода пресса из полости муфты "М" и полости головки "Г").

Математическое описание совместной работы воздухоподводящей пневмоголовки У328А в комплекте с пневмораспределителем У7126А и муфтой пресса

Состояние клапана *2* и поршня *1* на любом этапе перемещения описывается следующими общими дифференциальными уравнениями, составленными на основании закона движения Ньютона и в соответствии с принципом Д'Аламбера для бесконечно малого промежутка времени *dt*:

$$m_{\text{п}}\ddot{x}_i^{\text{п}} = \begin{cases} p_i^{\text{м}}\dfrac{\pi}{4}\left(D_{\text{п}}^2 - d_{\text{о}}^2\times 4\right) - p_i^{\text{а}}\dfrac{\pi}{4}\left(D_{\text{п}}^2 - d_{\text{п}}^2\right) + \\ +p_i^{\text{м}}\dfrac{\pi}{4}\left(d_{\text{кл}}^2 - d_{\text{шт}}^2\right) - p_i^{\text{м}}\dfrac{\pi}{4}\left(d_n^2 - d_{\text{шт}}^2 - d_{\text{о}}^2\times 4\right) - \\ -p_i^{\Gamma}\dfrac{\pi}{4}d_{\text{кл}}^2 P_i^{\text{пр}} - P_i^{\text{п}} - P_i^{\text{а}} \pm F_{\text{тр}}. \end{cases} \quad (1)$$

$$m_{\text{кл}}\ddot{x}_i^{\text{кл}} = p_i^{\text{м}}\frac{\pi}{4}\left[\left(D_{\text{кл}}^2 - D_{\text{п}}^2\right) - \left(d_{1\text{п}}^2 - d_{\text{п}}^2\right) + \left(d_{1\text{п}}^2 - d_{\text{кл}}^2\right)\right] + p_i^{\text{а}}\frac{\pi}{4}\left(D_{\text{п}}^2 - d_{\text{п}}^2\right) - p_i^{\Gamma}\frac{\pi}{4}\left(D_{1\text{кл}}^2 - d_{\text{кл}}^2\right) + P_i^{\text{м}} - P_i^{\Gamma} + P_i^{\text{а}} - P_i^{\text{п}} + p_a\frac{\pi}{4}\left(D_{1\text{кл}}^2 - D_{\text{кл}}^2\right). \quad (2)$$

$$m\ddot{x}_i = \frac{\left(p_i^{\text{м}} - p_a\right)\pi\left(D_1^2 - D_2^2\right)}{4} - C_{\text{пр}}^{\text{м}}x_{i-1} - F_{\text{тр}} - C_{\text{ф}}h_{\text{ф}} - C_{\text{тр}}h_{\text{тр}}. \quad (3)$$

Введем обозначения и размеры параметров пневмоголовки по рис. 4, *а*:

$p_i^{\text{м}}$, $p_i^{\text{а}}$, p_i^{Γ} и $p_{\text{р}}$ — текущие значения давлений в полостях соответственно: муфты "М", запоршневой полости клапана *2* "А", пневмоголовки "Г" и в ресивере;

$D_{\text{п}}$ = 100 мм — рабочий (расчетный) диаметр поршня *1*;

$d_{\text{о}}$ = 20 мм — диаметры четырех впускных отверстий в торце поршня *1*;

$d_{\text{п}}$ = 60 мм — диаметр центральной расточки в поршне *1*;

$d_{\text{кл}}$ = 50 мм — диаметр клапана *6* наполнения головки;

$d_{\text{шт}}$ = 10 мм — диаметр штока, соединяющего впускной клапан наполнения *6* с поршнем *1*;

$d_{\text{др}}$ = 9,5 мм — диаметры двух дроссельных отверстий *4*;

$d_{1\text{п}}$ = 80 мм — наружный диаметр штоковой части поршня *1*;

$d_{\text{а}}$ = 4 мм — диаметры двух отверстий, соединяющих запоршневую полость "А" с атмосферой;

$d_{\text{м}}$ = 65 мм — диаметр входного отверстия в муфту;

$D_{\text{кл}}$ = 106 мм — диаметр отверстия выхлопного клапана *2*;

$D_{1\text{кл}}$ = 125 мм — диаметр направляющей части клапана *2*;

$D_{\text{вх}}$ = 42 мм — диаметры шести выхлопных отверстий;

x — перемещение поршня муфты;

D_1, D_2 — наружный и внутренний диаметры поршня муфты;

$C_{\text{пр}}$, $C_{\text{ф}}$ и $C_{\text{пр}}^{\text{м}}$ — жесткости пружины головки, фрикционного контакта дисков и упора поршня в цилиндре муфты;

$h_{\text{ф}}$, $h_{\text{пр}}$ — деформации контактов фрикционного и упора поршня в цилиндре муфты;

$F_{\text{тр}}$ — сила трения при перемещении дисков муфты.

Текущие значения сил реакций, возникающих в местах контакта клапанов, и силу пружины определяют в зависимости от перемещения клапанов, контактных жесткостей: $C^{\text{м}}$ — клапана муфты; C^{Γ} — упора в корпусе пневмоголовки; $C^{\text{а}}$ — упора для поршня *1* и $C^{\text{п}}$ — седла клапана *6*, $\Delta_{\text{м}}$, $\Delta_{\text{п}}$ — деформация упоров клапана *2* в седло и клапана *2* в дно корпуса:

$P_i^{\text{м}}$ — реакция упора клапана *2* в седло: $P_i^{\text{м}} = c^{\text{м}}\left(\Delta_{\text{м}} - x_i^{\text{кл}}\right)$; $\Delta_{\text{м}} = \dfrac{P_{\text{пр}}^{\text{н}} - F_{\text{тр}}}{c_{\text{м}}}$;

P_i^{Γ} — реакция упора клапана наполнения *6* в седло: $P_i^{\Gamma} = c_{\Gamma}\left(x_i^{\text{кл}} - 2{,}0\right)$;

$P_i^{\text{а}}$ — реакция упора поршня *1* в дно клапана *2*: $P_i^{\text{а}} = c_{\text{а}}\left(\left(x_i^{\text{кл}} - x_i^{\text{п}}\right) - 1{,}3\right)$;

$P^{\text{п}}$ — реакция упора клапана *2* в дно корпуса головки: $P_i^{\text{п}} = c^{\text{п}}\left(\Delta_{\text{п}} - \left(x_i^{\text{п}} - x_i^{\text{кл}}\right)\right)$,

$$\Delta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{пр}}^{\text{н}} - F_{\text{тр}}}{c_{\text{п}}};$$

$P_{\text{пр}}^{\text{н}}$, $P_i^{\text{пр}}$ — исходное по рис. 3 и текущее значения силы пружины *5*.

После подстановки исходных размеров (по рис. 4 в см) [2] и преобразования дифференциальные уравнения движения клапана *2* массой $m_{кл} = 4{,}5$ кг, поршня пневмоголовки массой $m_п = 1{,}1$ кг примут следующий вид:

$$m_{кл}\ddot{x}_i^{кл} = 18{,}34p_i^м - 50{,}24p_i^а - 103p_i^Г + \\ +P_i^м + P_i^а + P_i^Г - P_i^п + 34{,}45p^а; \quad (4)$$

$$m_n\ddot{x}_i^п = 69{,}9p_i^м - 50{,}24p_i^а - 19{,}625p_i^Г - \\ -P_i^{пр} - P_i^а + P_i^п \pm F_{тр}. \quad (5)$$

Решение полученных дифференциальных уравнений (4) и (5) совместно с дифференциальным уравнением (3) движения поршня муфты осуществляем с помощью численного интегрирования методом итераций при допущениях о равноускоренных режимах движения клапанов в рамках элементарно малого промежутка времени *dt* [2]:

$$\dot{x}_i^{кл} = \dot{x}_{i-1}^{кл} + \ddot{x}_i^{кл}\Delta t; \\ \dot{x}_i^{кл} = x_i^{кл} + \dot{x}_{i-1}^{кл}\Delta t + \frac{\ddot{x}_i^{кл}\Delta t^2}{2}; \quad (6)$$

$$\dot{x}_i^п = \dot{x}_{i-1}^п + \ddot{x}_i^п\Delta t; \\ \dot{x}_i^п = x_i^п + \dot{x}_{i-1}^п\Delta t + \frac{\ddot{x}_i^п\Delta t^2}{2}; \quad (7)$$

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{i-1}\ddot{x}_i\Delta t;\ \ x_i + x_i + \dot{x}_{i-1}\Delta t + \frac{\ddot{x}_i\Delta t^2}{2}, \quad (8)$$

где $x_{i-1} = h_{нач}$; $h_{нач}$ — приведенная к площади поршня муфты начальная высота заполняемой полости "М" муфты;

$x_i^{кл}$, $\dot{x}_i^{кл}$ и $\ddot{x}_i^{кл}$ — путь, скорость и ускорение при перемещении клапана *1* в процессе включения или отключения;

x_i, $\dot{x}_i$ и $\ddot{x}_i$ — путь, скорость и ускорение при перемещении поршня муфты;

$x_i^п$, $\dot{x}_i^п$ и $\ddot{x}_i^п$ — путь, скорость и ускорение при перемещении поршня *1* пневмоголовки;

$h_н^Г$ — приведенная начальная высота общего объема трубопровода от пневмораспределителя до головки и полости "Г" головки:

$$h_н^Г = \frac{\left(\frac{\pi}{4}d_{тр}^2 l_{тр} + V_н^Г\right)}{F_{кл}}.$$

На первом этапе дросселирования (соответствует рис. 4, *а*) после включения пневмораспределителя У7126А осуществляется заполнение полости "Г" постоянного объема пневмоголовки через трубопровод 1 1/2" (с условным проходом $D_у = 40$ мм) с одновременным заполнением полости муфты "М" переменного объема через два отверстия диаметром 9,5 мм ($D_у = 13{,}43$ мм) в донышке клапана *2* из заполняющейся полости "Г" пневмоголовки постоянного объема.

На этом этапе: исходное положение клапана *2* — закрытое, но не нажатое ($x_i^{кл} = 0$), исходное положение клапана *6* — закрытое, но не нажатое ($x_i^п = 0$), или на расстоянии 14 мм от упора, если клапан не успел закрыться от действия силы пружины *5*.

Рассматривая уравнения состояния газа в полостях наполнения и опорожнения, определим изменения давления воздуха, действующее на соответствующие площади.

Изменение давления при заполнении и выхлопе будет определяться поступлением (или расходом) массового количества воздуха в полость "Г" головки $\Delta p_i^Г$, в полость "М" муфты — $\Delta p_i^м$ и в запоршневую полость "А":

$$\Delta p_i^Г = \frac{k}{h_н^к + x_i^{кл}}\left[\frac{\left(\pm G_i^Г \mp G_i^м\right)RT}{F_{кл}} - p_{i-1}^Г\dot{x}_i^{кл}\right]\Delta t; \quad (9)$$

$$\Delta p_i^м = \frac{k}{x_i^м}\left[\pm\frac{4G_i^м RT}{\pi\left(D_1^2 - D_2^2\right)} - p_{i-1}^м\dot{x}_i^м\right]\Delta t; \quad (10)$$

$$\Delta p_i^а = \frac{k}{h_н^а - (x_i^п - x_i^{кл})}\times \\ \times\left[\frac{G_i^а RT}{F_а} - p_{i-1}^а\left(\dot{x}_i^п - \dot{x}_i^{кл}\right)\right]\Delta t. \quad (11)$$

Уровни давлений в этих полостях определяют по выражениям:

$$p_i^Г = p_{i-1}^Г + \Delta p_i^Г; \quad (12)$$

$$p_i^м = p_{i-1}^м + \Delta p_i^м; \quad (13)$$

$$p_i^а = p_{i-1}^а + \Delta p_i^а. \quad (14)$$

Верхние знаки "+" и "–" перед $G_i^Г$, $G_i^м$ в выражениях (9) и (10) будут определять процесс заполнения полости "Г" клапана при включении, нижние — процесс опорожнения этой полости при отключении.

Для выражения (11) знак "+" перед $G_i^а$ — вытеснение, знак "–" — всасывание.

Обозначения величин:

$G_i^Г$ — массовый расход воздуха, поступающего из ресивера в полость "Г" воздухоподводящей пневмоголовки или выхлопываемого из полости "Г" в атмосферу через пневмораспределитель У7126А с условным проходом $D_у = 40$ мм (1 1/2");

$G_i^{\text{м}}$ — массовый расход воздуха, поступающего из полости "Г" пневмоголовки в муфту "М" при включении, или из полости муфты "М" в полость "Г" при отключении сначала через два отверстия диаметром 9,5 мм в донышке клапана *2* и потом, совместно с открывающимся клапаном *2*;

$G^{\text{а}}$ — массовый расход воздуха поступающего из атмосферы в полость "А" или вытесняемого из полости "А" в атмосферу при относительном перемещении клапана *2* и поршня *1*.

Массовый расход воздуха G_i^{Γ}, поступающего из ресивера через пневмораспределитель У7126А с $D_{\text{у}} = 40$ мм, для данного случая при $0 < p_i^{\Gamma} < 0{,}528p_{\text{р}}$ опишем уравнением критического истечения:

$$G_i^{\Gamma} = \mu f_{\Gamma} 0{,}396 \frac{p_{\text{р}}}{\sqrt{T}} = 0{,}02327 \mu f_{\Gamma} p_{\text{р}} \qquad (15)$$

и при $0{,}528p_{\text{р}} < p_i^{\Gamma} < 1$ по уравнению:

$$G_i^{\Gamma} = \mu f_{\Gamma} 1{,}53 \frac{p_{\text{р}}}{\sqrt{T}} \sqrt{\left(\frac{p_i^{\Gamma}}{p_{\text{р}}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_i^{\Gamma}}{p_{\text{р}}}\right)^{\frac{k+1}{k}}} = 0{,}0891267 \mu f_{\Gamma} p_{\text{р}} \sqrt{\left(\frac{p_i^{\Gamma}}{p_{\text{р}}}\right)^{1{,}428} - \left(\frac{p_i^{\Gamma}}{p_{\text{р}}}\right)^{1{,}714}}. \qquad (16)$$

Массовый расход воздуха $G_i^{\text{м}}$ вначале процесса в режиме докритического истечения определяем по формуле

$$G_i^{\text{м}} = \mu f_{\text{м}} 1{,}53 \frac{p_i^{\Gamma}}{\sqrt{T}} \varphi(Y_i) = 0{,}0891267 \mu f_{\text{м}} p_i^{\Gamma} \sqrt{\left(\frac{p_i^{\text{м}}}{p_i^{\Gamma}}\right)^{1{,}428} - \left(\frac{p_i^{\text{м}}}{p_i^{\Gamma}}\right)^{1{,}714}} \qquad (17)$$

до соотношения $p_i^{\text{м}} = 0{,}528\, p_i^{\Gamma}$, а после перехода через это соотношение по уравнению критического истечения:

$$G_i^{\text{м}} = \mu f_{\text{м}} 0{,}396 \frac{p_{\text{р}}}{\sqrt{T}} = 0{,}02327 \mu f_{\text{м}} p_{\text{р}}. \qquad (18)$$

Относительное перемещение поршня *1* в клапане *2* должно сопровождаться вытеснением воздуха из полости "А" или всасыванием из атмосферы.

Для определения $p_i^{\text{а}}$ запишем уравнение докритического и критического истечения воздуха через два отверстия диаметром 4 мм:

при $0{,}528 < \frac{p_{\text{а}}}{p_i^{\text{а}}} < 1$ по уравнению

$$G_i^{\text{а}} = \mu f_a 1{,}53 \frac{p_{\text{а}}}{\sqrt{T}} \sqrt{\left(\frac{p_{\text{а}}}{p_i^{\text{а}}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{\text{а}}}{p_i^{\text{а}}}\right)^{\frac{k+1}{k}}} = 0{,}0891267 \mu f_{\text{а}} p_{\text{а}} \sqrt{\left(\frac{p_{\text{а}}}{p_i^{\text{а}}}\right)^{1{,}428} - \left(\frac{p_{\text{а}}}{p_i^{\text{а}}}\right)^{1{,}714}}; \qquad (19)$$

при $0 < \frac{p_{\text{а}}}{p_i^{\text{а}}} < 0{,}528$ по уравнению критического истечения

$$G_i^{\text{а}} = \mu f_{\text{а}} 0{,}396 \frac{p_{\text{а}}}{\sqrt{T}} = 0{,}02327 \mu f_{\text{а}} p_{\text{а}}, \qquad (20)$$

где μ — коэффициент расхода соответствующего проходного сечения; $f_{\text{г}}$, $f_{\text{м}}$, f_a — площадь проходного сечения с выбранным условным проходом.

Решение по данному алгоритму должно автоматически перейти в процесс открытия клапана *6* поршня *1* головки по достижении статического равновесия сил на поршне по уравнению (4), после чего клапан *6* поршня *1* будет открываться, начиная движение в обратную сторону, — это начало второго этапа заполнения полости муфты через отверстие увеличенного сечения (соответствует рис. 4, *б*).

Второй этап ускоренного заполнения пневмополости муфты начинается после достижения определенного соотношения давлений в пневмополости муфты $P^{\text{м}}$ и полости "Г" пневмоголовки P^{Γ}, соответствующая порогу срабатывания, равного 150 кПа, в результате чего поршень *1* головки переместится на 14 мм внутрь основного клапана *2* и откроет наполняющий клапан *6*.

К этому времени диски муфты должны быть уже сомкнуты и должен осуществиться полный разгон ведомых частей пресса.

Основным условием процесса заполнения на втором этапе, определяющим размер условного прохода наполняющего трубопровода, является достижение расчетного давления в муфте перед возникновением на эксцентриковом валу максимального расчетного момента технологической операции. Этот угол равен ≈55...60°, не доходя до КНП.

Выхлоп воздуха из муфты начинается со снятия электрической команды на отключение пневмораспределителя У7126А, что должно осуществляться после окончания прессом технологической операции при прохождении ползуном КНП. При этом в зависимости от быстродействия электропневмоаппаратуры и системы отключения угол поворота эксцентрикового вала при отключении муфты можно устанавливать больше, например, 200...230°.

После снятия электрического сигнала на отключение пневмораспределителя У7126А происходит сначала выхлоп воздуха из полости "Г" через трубопровод диаметром 1 1/2" с условным проходом 40 мм. После закрытия основного отверстия диаметром 50 мм дополнительным клапаном *7* поступление воздуха из полости муфты "М" в полость "Г" происходит только через два отверстия диаметром 9,5 мм.

По достижении определенного баланса сил клапан *2* вместе с поршнем *1* начнут перемещаться в сторону открытия выхлопного клапана *2,* осуществляя этим процесс выхлопа воздуха из муфты.

Решение приведенного алгоритма совместно с алгоритмом моделирования процессов включения и отключения муфт и тормозов кривошипных прессов, рассмотренных в работе [1], выполнено с помощью программы динамического расчета ускорительного клапана, обеспечивающего безударное включение и ускоренный выхлоп пневматических муфт кривошипных горячештамповочных прессов RABMUF_ g.for [2].

На рис. 6 приведена расчетная диаграмма процессов, происходящих при включении и отключении пневмоголовки У328А при установке ее на прессе номинальной силой 16 МН, полученная при решении по программе [2], выполненной на базе приведенного алгоритма.

Сравнение полученных расчетных процессов с экспериментальными (см. рис. 5 и 6) показало удовлетворительную количественную и качественную сходимость параметров.

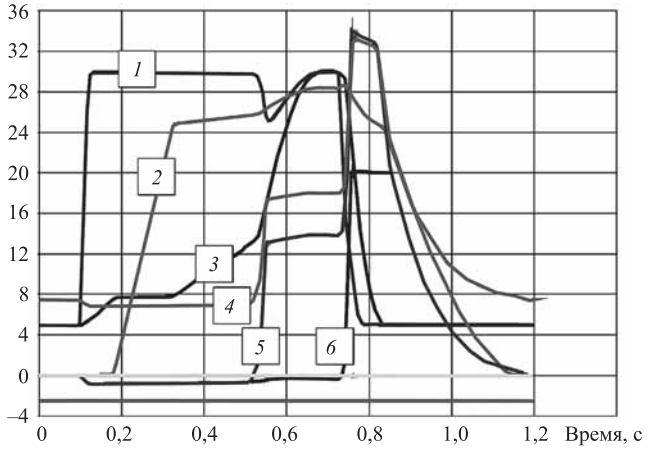


Рис. 6. Расчетная диаграмма процессов включения-отключения пневмоголовки У328А на прессе КГ8042 номинальной силы 16 МН в режиме "наладка" (исходное положение по рис. 4, *а*):

1 — давление воздуха в полости "Г" пневмоголовки, М5:1, кгс/см^2 (100 кПа); *2* — ход поршня муфты, М5:1, мм; *3* — давление воздуха муфты, М5:1, кгс/см^2 (100 кПа); *4* — сила пружины *5* пневмоголовки, кгс (10 Н); *5* — ход клапана *2* пневмоголовки, М1:1, мм; *6* — ход поршня 1 пневмоголовки, М1:1, мм

Выводы

1. Разработанная система управления муфтами кривошипных горячештамповочных прессов на базе пневмоголовки У328А в сочетании с пневмораспределителем У7126А, экспериментально и теоретически проверенная, зарекомендовала свою приоритетность применением для гаммы кривошипных горячештамповочных прессов силой 6,3...25 МН.

2. Представленный алгоритм с помощью разработанной на его базе программы для ЭВМ RABMUF_ g.for позволяет расчетным методом описывать процессы, происходящие при включении и отключении муфт КГШП. Программа дает возможность получать расчетные параметры значительного числа дополнительных процессов, происходящих при включении и отключении муфты с помощью пневмоголовки У328А и позволяет осуществить исследования этих процессов для выбора оптимальных решений

3. Разработанная программа динамического расчета на базе приведенного математического описания ускорительного клапана, обеспечивающего безударное включение и ускоренный выхлоп при выключении пневматических муфт кривошипных горячештамповочных прессов, рекомендована к применению по оценке оптимальности выбора размеров подводящих трубопроводов применительно к величинам пневматических объемов муфт и тормозов, заполняемых при включении и опорожняемых при отключении, для гаммы кривошипных горячештамповочных прессов и других кривошипных прессов, оснащаемых пневматическими муфтами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Соков В.И., Малородова Л.И.** Математическое моделирование процессов включения и отключения муфт и тормозов кривошипных прессов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давления. 2008. № 5. С. 29—32.

2. **Свидетельство РФ** о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2014613115 — 18 марта 2014 г. / В.И. Соков, И.И. Соков, А.Т. Крук, В.А. Крук, А.Д. Хван.

Владимир Ильич Соков, канд. техн. наук;
Александр Тимофеевич Крук, д-р техн. наук,
kruk938@mail.ru;
Илья Ильич Соков;
Виталий Александрович Крук, канд. техн. наук

УДК 621.7-8

А.А. Анцифиров, В.А. Кривошеин, Д.В. Зимов
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Совершенствование конструкции гидравлического пресса

Модернизирована конструкция двухколонного гидравлического пресса производства АМО "ЗиЛ" малой номинальной силы в четырехколонный пресс. Приведены результаты совершенствования конструкции и исследований на прочность основных узлов пресса: верхней поперечины с главным гидравлическим цилиндром, нижней поперечины и колонн. В конструкции верхней поперечины увеличено число проушин под крепление гайками верхней части каждой из четырех колон, а в конструкции нижней поперечины — для расположения основания колонн пресса. Приведены сведения о подобранном гидроприводе пресса.

Ключевые слова: гидравлический пресс; исследование; модернизация; прочность.

The design of the two-column hydraulic press produced by the AMO "ZiL" with small nominal force in four-column press is modernized. The results of improving of the design and researches on the strength of the main components of the press are presented: movable crosspiece with the main hydraulic cylinder, columns and frame. The movable crosspiece design has changed in terms of increasing the lug number for bracing with the nuts of the upper part of the four columns, and the frame — for the placement of the base of each of the four column press. The information on the selected hydraulic press of the press is given.

Keywords: hydraulic press; research; modernization; strength.

Разработку нового или модернизацию существующего кузнечно-прессового оборудования целесообразно осуществлять на основе функционирующих и зарекомендовавших себя в процессе эксплуатации конструкций прессов. При этом также следует уделять внимание унификации разрабатываемого или модернизируемого оборудования.

Разрабатываемые узлы и детали прессового оборудования необходимо проверять на работоспособность, например, расчет на прочность следует осуществлять исходя из условий нагружения пресса номинальной силой. Такие задачи целесообразно решать с использованием программного обеспечения типа ANSYS, с помощью метода конечных элементов [1].

Ответственными узлами гидравлических прессов, испытывающими переменные нагрузки, являются верхняя и нижняя поперечины, главный гидравлический цилиндр и колонны [2—4].

Усовершенствованная конструкция гидравлического четырехколонного пресса разработана основе двухколонного пресса производства АМО "ЗиЛ" при незначительном увеличении габаритных размеров самого пресса [5]. Четырехколонная конструкция расширяет технологические возможности модернизируемого двухколонного пресса и позволяет осуществлять процесс штамповки деталей и полуфабрикатов номинальной силой до 5 МН.

В модернизированной конструкции пресса также внедрена подвижная поперечина, что позволяет расширить технологическую применяемость пресса за счет повышения точности перемещения поперечины, при этом колонны пресса играют роль направляющих, а благодаря Т-образным пазам в нижней части подвижной поперечины обеспечивается удобное крепление штамповой оснастки.

Изначально двухколонный пресс является кузнечно-штамповочной машиной специального назначения, с помощью которой можно получить петли грузовых стропов, расчалки мачт, оттяжки крана, тяговые элементы. Общий вид двухколонного пресса представлен на рис. 1.

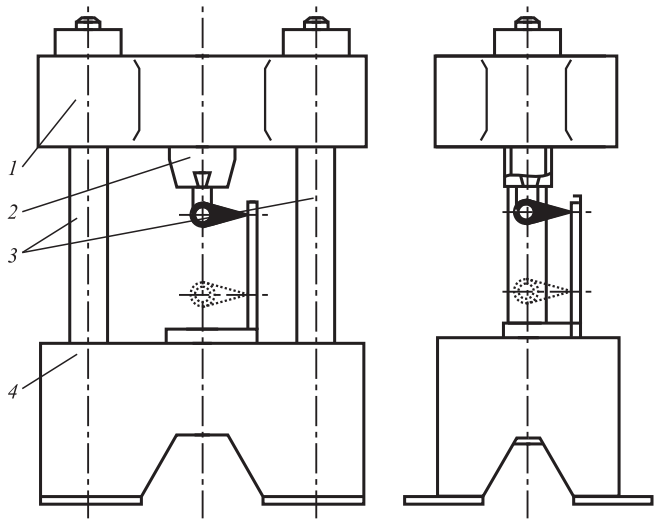


Рис. 1. Общий вид двухколонного гидравлического пресса [5]:

1 — верхняя поперечина; *2* — главный цилиндр пресса; *3* — колонны; *4* — нижняя поперечина

Двухколонный пресс состоит из таких базовых конструктивных узлов, как верхняя поперечина *1* с гидроцилиндром *2*, колонн *3* и нижней поперечины *4*. Верхняя поперечина с двумя проушинами под колонны пресса служит одновременно корпусом для главного цилиндра *2*. В двух проушинах (рис. 2, *а*) поперечины с помощью гаек крепится верхняя часть колонн *3*.

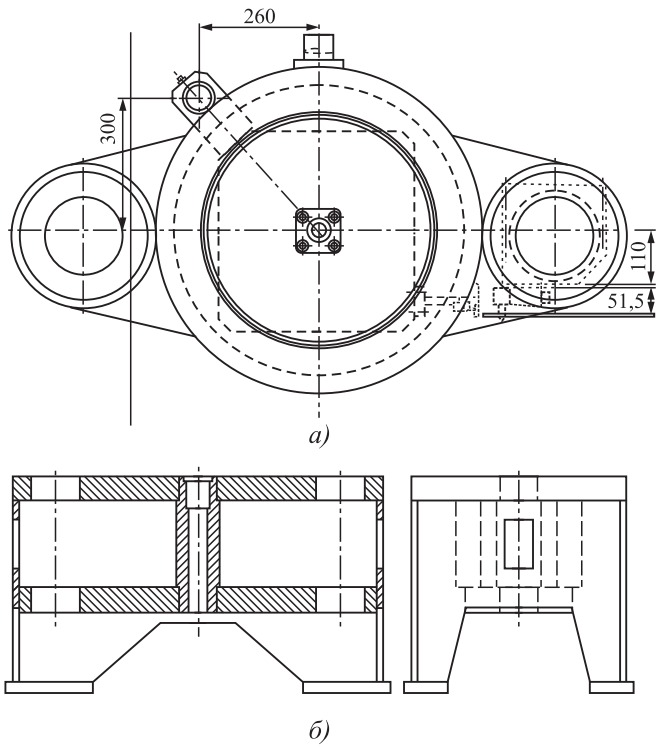


Рис. 2. Верхняя (*а*) и нижняя (*б*) поперечины двухколонного гидравлического пресса [5]

Основание каждой из колонн *3* расположено в нижней поперечине *4* пресса (рис. 2, *б*).

Процесс деформирования на двухколонном прессе осуществляется путем подачи жидкости в гидравлический цилиндр, что приводит к перемещению штока цилиндра, на котором закрепляется штамповая оснастка.

Технические характеристики двухколонного гидравлического пресса [5]

Номинальная сила, МН	0,2...5
Рабочий ход, мм	265
Ход выталкивателя, мм	5
Скорость перемещения штока гидроцилиндра, м/мин:	
подвод	1
прессование	0,4
отвод	2,8
Рабочее давление, МПа	25

Изменение силы пресса от рабочего давления приведено на рис. 3.

Основными узлами пресса, которые необходимо подвергнуть конструктивному изменению, являются верхняя поперечина, содержащая главный гидравлический цилиндр, нижняя поперечина и колонны пресса.

Расчет на прочность предложенной конструкции главного гидравлического цилиндра и неподвижной верхней поперечины при нагружении цилиндра путем обеспечения рабочего давления 25 МПа [6—8] рассмотрено в работе [9]. Установлено, что поперечина вместе с гидравлическим цилиндром четырехколонного гидравлического пресса удовлетворяют необходимым прочностным требованиям для обеспечения технологического процесса штамповки.

Далее исследовали обеспечение сопряжения колонн с неподвижной поперечиной в результате затяжки четырехколонного гидравлического пресса [10—12]. Полученные расчетные параметры термической затяжки колонн удовлетворяют технологической эксплуатации гидравлического пресса с учетом его нагружения номинальной силой 5 МН.

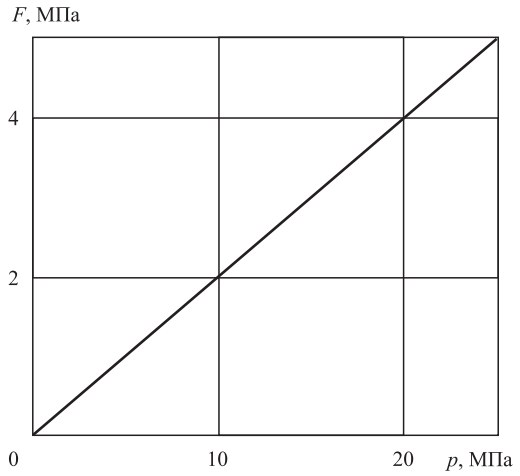


Рис. 3. Изменение силы пресса от рабочего давления [5]

Четырехколонный гидравлический пресс содержит подвижную поперечину с четырьмя проушинами под колонны. Перемещение поперечины обеспечивается конструктивным сопряжением со штоком главного цилиндра пресса. Материал поперечины — сталь 45Л (ГОСТ 977—88), предел текучести которой оставляет $\sigma_т$ = 314 МПа. Напряжения в подвижной поперечине (рис. 4, см. обложку) при нагружении пресса номинальной силой составляют $\sigma_{экв}$ = 130,5 МПа, что отвечает условиям прочности при допускаемых напряжениях [σ] = 150 МПа.

Исходный вариант конструкции нижней поперечины двухколонного пресса также был изменен: увеличено число отверстий под нижние части каждой из четырех колон. Максимальные напряжения в этом случае возникают в горизонтальной плите поперечины пресса (рис. 5, см. обложку), материалом которой принята сталь 45, вид термической обработки М35 — закалка с охлаждением в масле, предел текучести $\sigma_т$ = 650 МПа.

Номинальная нагрузка при моделировании прикладывалась в точке с эксцентриситетом в координате x = 30 мм, y = 30 мм от оси симметрии гидравлического пресса. При таком приложении силы деформирования наступает момент раскрытия стыка колон с верхней поперечиной пресса [12].

Напряжение в процессе нагружения составило $\sigma_{экв}$ = 239,8 МПа при допускаемом напряжении [σ] = 310 МПа.

Таким образом, разработанные варианты конструкций подвижной и нижней поперечин для четырехколонного гидравлического пресса полностью удовлетворяют технологическому требованию обеспечения процессов деформирования при заложенной номинальной силе 5 МН.

Для предложенной конструкции четырехколонного гидравлического пресса моделированием исследован технологический процесс закрытой горячей объемной штамповки крестовины карданного вала ЗИЛ 130 [13], в результате чего сила деформирования составила F = 4,32 МН. Осуществлены подбор и проверка работоспособности гидропривода необходимой мощности в программном пакете ПА-9 [13].

Четырехколонный гидравлический пресс показан на рис. 6.

Технические характеристики четырехколонного гидравлического пресса

Номинальная сила, МН	0,2...5
Рабочий ход, мм	300
Скорость перемещения штока гидроцилиндра, м/мин:	
подвод	1
прессование	0,72
отвод	2,8
Рабочее давление, МПа	25

Заключение. Конструкция четырехколонного гидравлического пресса 5 МН в отличие от исходного варианта (двухколонного пресса) позволяет более точно осуществлять технологический процесс штамповки за счет перемещения поперечины, направляющими для которой являются колонны пресса. Формирование давления в главном гидравлическом цилиндре пресса осуществляется благодаря работе гидропривода [13] мощностью 55 кВт.

Основные усовершенствованные узлы четырехколонного пресса обеспечивают требуемые прочностные характеристики и функционирование нагружения номинальной силой 5 МН.

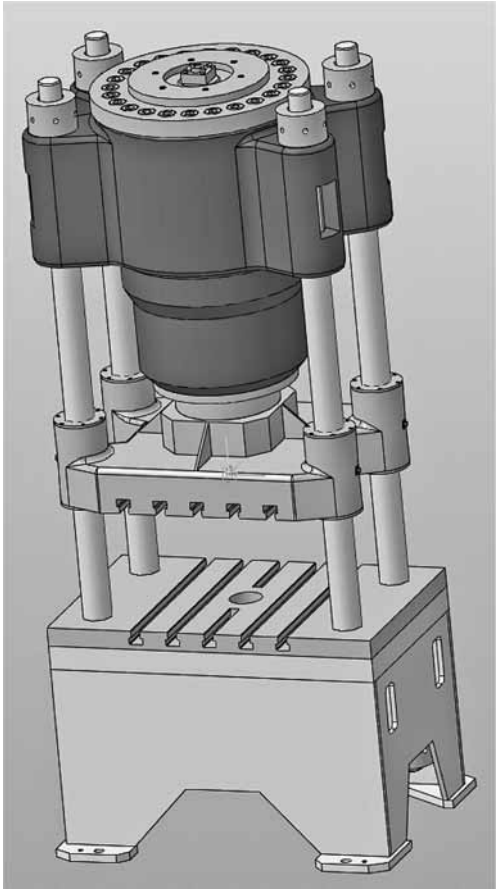


Рис. 6. Четырехколонный гидравлический пресс

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Басов К.А.** ANSYS для конструкторов. М.: ДМК Пресс, 2009. 238 с.
2. **Кузнечно-прессовое** оборудование Уралмашзавода / М.А. Карасев, И.В. Баранов, Ф.С. Блик, В.С. Сошников. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы-"Марат", 2004. 479 с.
3. **Коркин Н.П.** Система управления прочностными и технологическими параметрами гидравлического пресса со станиной колонного типа // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 6. С. 21—26 с.
4. **Анализ** отказов, предупреждение разрушений, и восстановление базовых деталей мощных гидравлических прессов / Н.П. Коркин, Д.А. Кулагин, А.П. Моисеев, И.А. Сурков // Технология легких сплавов. 2006. № 1—2. С. 181—189.
5. **Пресс** гидравлический для опрессовки стальных канатов. Паспорт пресса. ЗиЛ, 1982. 35 с.
6. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. 14-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 590 с.
7. **Коркин Н.П.** Исследование условий эксплуатации и разработка системы управления прочностными и технологическими параметрами гидравлических прессов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 120 с.
8. **Марков Д.Г.** Разработка, исследование и обоснование технических решений для увеличения силы гидравлического пресса с 200 до 350 МН: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 79 с.
9. **Анцифиров А.А., Кривошеин В.А., Зимов Д.В.** Способ моделирования главного цилиндра гидравлического пресса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 3. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1595
10. **Коркин Н.П., Сурков И.А., Тимохин И.В.** Влияние эксцентриситета нагружения на напряженное состояние колонн мощного гидравлического пресса // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 5. С. 40—43.
11. **Коркин Н.П., Сурков И.А., Тимохин И.В.** Влияние эксцентриситета нагружения гидравлического пресса на напряженное состояние подвижной поперечины // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 4. С. 28—38.
12. **Анцифиров А.А., Кривошеин В.А.** Теоретическое исследование обеспечения спряжения колон с поперечиной гидравлического пресса // Качество и жизнь. 2017. № 2 (14). С. 103—107.
13. **Анцифиров А.А., Кривошеин В.А.** Подбор оптимального гидравлического привода для пресса номинальной силой 5 МН // Науковедение. 2017. Т. 9. № 5. https://naukovedenie.ru/PDF/44TVN517.pdf (дата обращения 20.12.2017).

Алексей Анатольевич Анцифиров, канд. техн. наук,
aaleksei@inbox.ru;
Виталий Александрович Кривошеин;
Дмитрий Вячеславович Зимов

УДК 621.771.63

С.В. Поворов
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Д.В. Егоров *(ООО "МОБИПРОФ", г. Москва)*

Исследование процесса формовки детали в виде швеллера путем экспериментального исследования и математического моделирования

Разработана математическая модель процесса формовки детали в виде швеллера на профилегибочном стане. Проведено сравнение результатов моделирования с результатами измерений на стане.

Ключевые слова: профилегибка; формовка в роликах; швеллер; калибровка.

The mathematical model of the forming process of part in the form of steel channel by roll forming mill is developed. Comparing of the simulation results with measurements carried out on the mill is performed.

Keywords: forming; roll forming; channel bar; caliber.

Экспериментальное исследование процесса формовки швеллера из листовой металлической заготовки проведено на профилегибочном стане, предназначенном для производства профилей, применяемых как несущие элементы в конструкциях рам и каркасов, возводимых при строительстве.

В стане установлено шесть формующих клетей, в которых осуществляется подгибка полок на углы 10, 30, 55, 70, 85 и 90° соответственно. Режим формовки соответствует второй схеме, рассмотренной в работе [1], т.е. при формовке профиля ширина его стенки и радиус в месте изгиба постоянны, а увеличение угла подгибки достигается увеличением длины дуги радиусной зоны и уменьшением ширины подгибаемой полки на такое же значение [2]. Расстояние между осевыми плоскостями валков 247,5 мм. Размеры заготовок и получаемого профиля приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Расчетные размеры получаемого профиля и заготовки

Номер образца	Ширина			Толщина штрипсы
	полки $b_п$	стенки $b_с$	штрипсы	
	мм			
1	27,8	28	81,0	0,5
2	27,9	28	81,3	0,4
3	13,75	28	53	0,5

В процессе эксперимента листовая заготовка — штрипс задавалась в стан, после чего происходил ее захват вращающимися валками и следовало движение заготовки через формующие клети. После того как передний край заготовки вышел из последней клети, стан был остановлен. Поскольку длина заготовки составляет 1260 мм, что больше расстояния между первой и последней клетями, то вся заготовка на момент остановки стана находилась в контакте с формующими роликами.

На момент остановки стана наблюдался установившийся процесс деформирования, т.е. деформированное состояние заготовки в каждом сечении, неподвижном относительно стана, остается постоянным при движении заготовки через него. По-

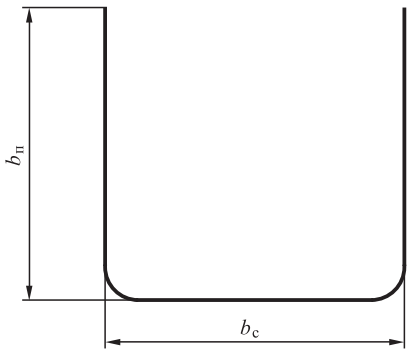


Рис. 1. Форма поперечного сечения профиля

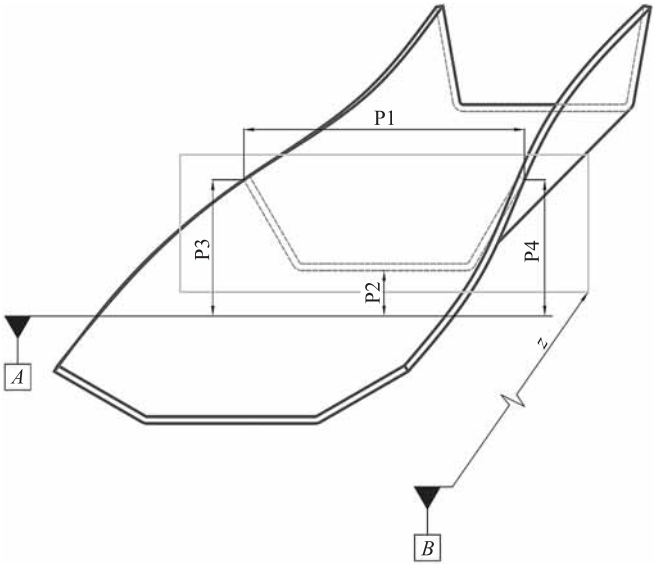


Рис. 2. Схема измерения параметров

этому для изучения параметров, характеризующих деформацию поперечного сечения при прохождении всех стадий формообразования, нет необходимости исследовать отдельно взятое сечение во время его движения вдоль стана, а можно остановить процесс и проводить измерения на неподвижной заготовке в разных поперечных сечениях, отсчитывая их координату вдоль оси прокатки от одной базы измерений.

На рис. 2 показан фрагмент заготовки, находящейся на некотором этапе деформирования между клетями (клети и формующие валки не показаны). Для каждого сечения определяли его координату z от базы B (осевая плоскость валков первой клети) вдоль направления движения полосы. В общем случае для сечения измеряли четыре параметра: P1 — расстояние между кромками подгибаемых полок; P2 — расстояние между нижней точкой стенки швеллера и базовой поверхностью A; P3, P4 — расстояние от базы A до верхней точки левой и правой кромок соответственно.

Измерения проводили измерительной линейкой и штангенциркулем, так как заготовка находилась в контакте с роликами.

Цель исследования — оценка адекватности математического моделирования процесса профилирования путем сравнения значений одних и тех же параметров, полученных экспериментально и математическим моделированием.

Математическое моделирование выполняли с использованием программы LS-Dyna, в которой реализованы численные методы решения задачи механики деформируемого твердого тела. Применяли доработанную модель, результаты расчета которой приведены в работе [3].

При моделировании формующие валки рассматривались как абсолютно жесткие тела, расчетная сетка из оболочечных элементов создавалась только на рабочих поверхностях, контактирующих с заготовкой. Для описания поведения заготовки выбран оболочечный конечный элемент, так как она является тонкостенным телом. Поскольку формуемый профиль симметричный, то для моделирования была использована только часть геометрии, отсеченная плоскостью YZ, а действие другой части геометрии заменено эквивалентными граничными условиями. На рис. 4 показана геометрия и построенная на ней расчетная сетка.

Для описания поведения материала заготовки (сталь 08пс) была выбрана билинейная модель упругопластичного материала с кинематическим упрочнением. Для определения механических характеристик из того же материала, из которого изготовлена заготовка, были вырезаны три образца (рис. 5) в соответствии с ГОСТ 11701—84.

При испытаниях образцы нагружали до образования шейки, которая видна на рис. 6, *а*, *б*.

Диаграммы растяжения приведены на рис. 7.

По приведенным диаграммам растяжения были определены механические характеристики материала: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; предел текучести $\sigma_т$ = 350 МПа; модуль упрочнения $E_т$ = 586,7 МПа. На рис. 8 представлен фрагмент диаграммы растяжения образцов, ограниченный значением деформации 10 %, на который наложен график аппроксимирующей билинейной кривой.

В результате расчета математической модели получены значения перемещений и напряженно-деформированного состояния заготовки. На рис. 9 показана деформированная заготовка на одной из последних стадий формообразования.

Рис. 3. Заготовка и процесс измерения значений геометрических параметров P1—P4 и координаты z сечения

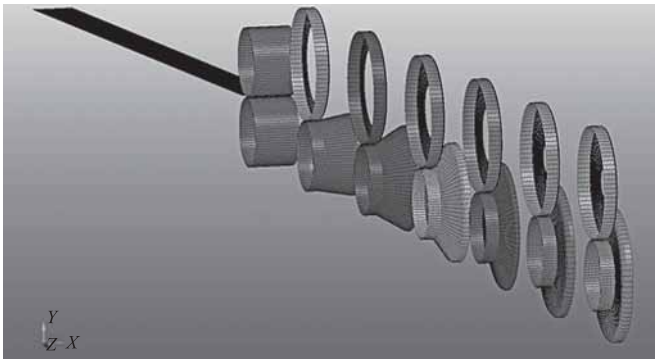


Рис. 4. Геометрия и расчетная сетка заготовки и рабочей поверхности формующих роликов

Для определения параметров, обозначенных на схеме измерения (см. рис. 2), было выбрано сечение у переднего края заготовки, которое проходит все стадии формообразования, и по мере его продвижения были записаны значения параметров.

На рис. 10 сопоставлены результаты экспериментальных данных и математического моделирования для трех рассматриваемых образцов, где параметр P1 соответствует ширине профиля, высоте профиля соответствует разность параметров P3—P2 и P4—P2 для левой и правой стенок профиля соответственно.

На рис. 10, *б*, *г*, *е* значки ⊳ и ⊲ — значения для левой и правой кромки заготовки соответственно. Сплошная линия одна, так как при моделировании использовано свойство симметрии и рассмотрена подгибка одной полки, полагая, что другая полка деформируется аналогично.

Приведенные на рис. 10 графики показали хорошее совпадение значений параметров, измеренных в процессе эксперимента и вычисленных в результате математического моделирования. В среднем отклонение не превышает 7 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

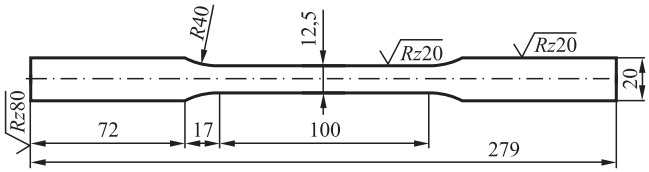


Рис. 5. Образец для испытания на растяжение

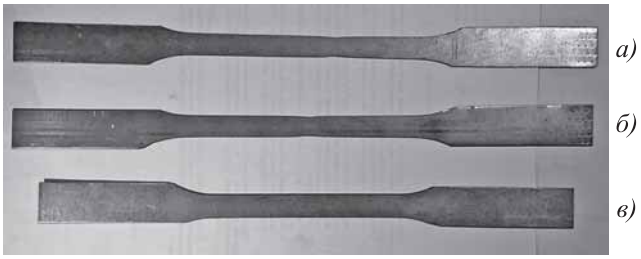


Рис. 6. Образцы после испытания (*а*, *б*) и исходный образец (*в*)

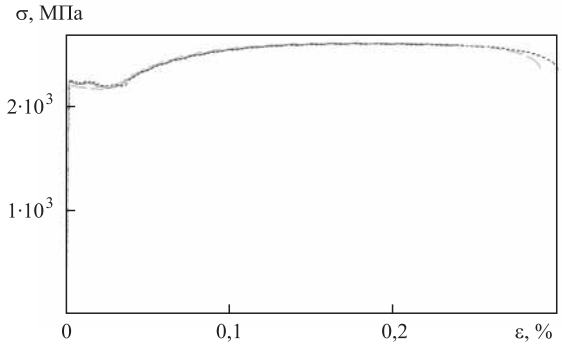


Рис. 7. Диаграммы растяжения образцов

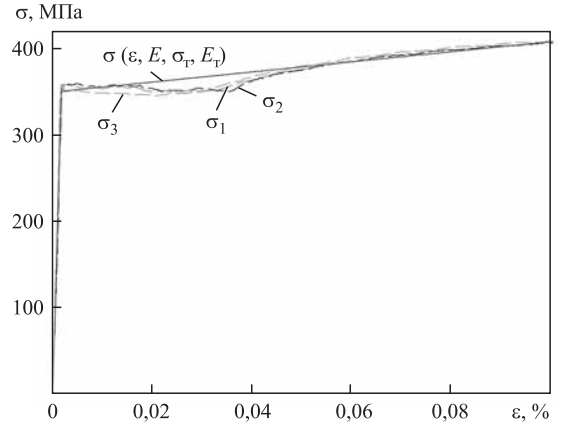


Рис. 8. Диаграммы растяжения образцов и ее аппроксимация билинейной кривой

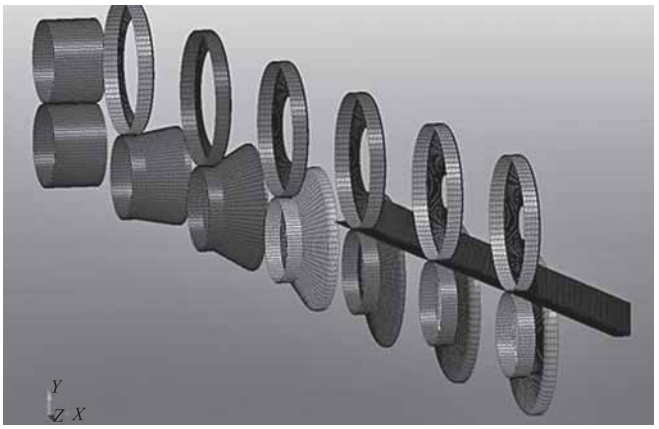


Рис. 9. Деформированная заготовка

На следующем этапе исследования данного процесса формообразования разработанная модель будет применена для изучения напряженно-деформированного состояния заготовки в целях выявления возможных дефектов готовой продукции, объяснения причин их возникновения и на основе этого предложения мер, направленных на устранение дефектов.

Заключение. Сравнение значений геометрических параметров (ширины между подгибаемыми полками профиля и его высоты) на промежуточных стадиях формообразования, полученных в результате реше-

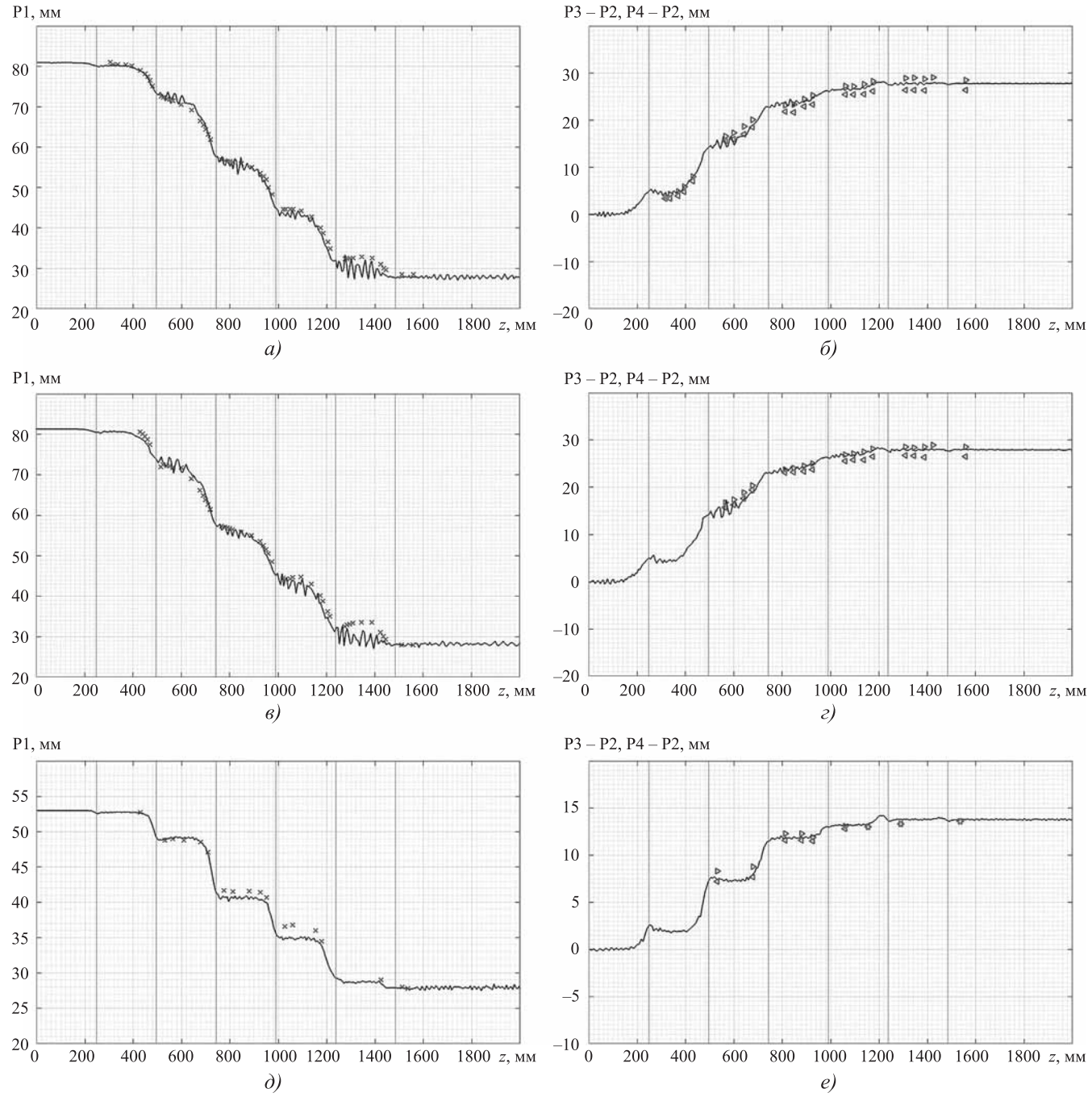


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета для образцов № 1 (*а*, *б*), № 2 (*в*, *г*) и № 3 (*д*, *е*):
а, *в*, *д* — ширина профиля; *б*, *г*, *е* — высота профиля; **—** — математическое моделирование; ×, ▷, ◁ — эксперимент

ния математической модели, с экспериментальными результатами показало, что отклонение расчетных значений в среднем не превышает 7 %, это является приемлемой точностью для инженерных расчетов. Таким образом, разработанная математическая модель адекватно описывает исследуемый процесс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

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

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

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

УДК 621.9.001.3

Н.И. Каменская
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Восстановление микроструктуры паропроводных труб из стали 15Х1М1Ф после длительной эксплуатации на ТЭС

Приведены результаты исследований микроструктуры и технология проведения восстановительной термической обработки (ВТО) паропроводов ТЭС из теплоустойчивой стали 15Х1М1Ф, прошедших длительную эксплуатацию. Показана возможность восстановления деградированной микроструктуры паропроводов в процессе ВТО.

Ключевые слова: паропровод; гибы; термическая обработка; микроструктура; микроповрежденность порами ползучести.

The results of studies of the microstructure and technology of the recovering heat treatment of steam pipelines of thermal power plant from heat-resistant steel 15Kh1M1F after long-term operation are presented. The possibility of restoration of degraded microstructure of steam pipelines in the recovering heat treatment is shown.

Keywords: steam pipeline; bends; heat treatment; microstructure; microdamage by creep pores.

Введение. Паропроводы, эксплуатируемые в настоящее время на ТЭС, значительно превысили свой расчетный ресурс, заложенный при проектировании. Расчетный срок службы обусловлен в основном процессами ползучести металла и опасностью его разрушения в результате исчерпания длительной прочности в паропроводах, работающих при высоких температурах и напряжении.

Паропроводы или их отдельные элементы, изготовленные из теплоустойчивых сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф, исчерпавшие свой расчетный ресурс в процессе длительной эксплуатации, как правило, подлежат замене. Основными показателями, определяющими необходимость замены, являются значительные изменения микроструктуры металла, увеличенная скорость ползучести, недопустимая степень микроповрежденности металла порами ползучести.

На ТЭС России получила распространение *восстановительная термическая обработка* (ВТО), как метод продления ресурса паропроводов и их элементов, находящихся в эксплуатации свыше 150...200 тыс. ч (20...25 лет).

ВТО рассматривается как ремонтная операция и является альтернативой замене паропроводов на новые. Цель ВТО — восстановление микроструктуры, механических и жаропрочных свойств металла каждого трубного элемента паропровода до требований ТУ 14-3Р-55—2001 на поставку новых паропроводных труб, что позволяет продлить ресурс паропроводов не менее чем на 100 тыс. ч.

В работах [1—3] приведены результаты проведения ВТО паропроводов ТЭС, изготовленных из стали 12Х1МФ, по различным технологиям и с применением различного оборудования. Однако возможность проведения ВТО применительно к паропроводам из стали 15Х1М1Ф изучена недостаточно.

Паропроводы из стали 15Х1М1Ф эксплуатируются при более высоких параметрах по сравнению с паропроводами из стали 12Х1МФ: температура 550...565 °С, давление 10...16 МПа. Трубы из стали 15Х1М1Ф поставляются на ТЭС в термически обработанном состоянии после нормализации и высокого отпуска. В состоянии поставки они имеют сдаточную феррито-бейнитную микроструктуру, оцениваемую в баллах и регламентированную требованиями шкалы № 3 микроструктур по ТУ 14-3Р-55—2001.

В процессе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и давления про-

исходят деградация микроструктуры паропроводов — распад упрочняющей структурной составляющей — бейнита, переход основных легирующих элементов из твердого раствора феррита в карбиды, а также сфероидизация карбидной фазы. Образуется феррито-карбидная браковочная микроструктура. По границам и внутри зерен выделяются крупные скоагулированные карбиды, размер которых достигает 2...4 мкм. Металл с феррито-карбидной микроструктурой обладает пониженными механическими и жаропрочными свойствами.

В наиболее слабых участках паропроводов — гибах после длительной эксплуатации в условиях ползучести появляется и накапливается микроповрежденность в виде пор ползучести. Максимальная микроповрежденность наблюдается на растянутой зоне гибов, по которой в основном и происходит их разрушение. Сначала образуются единичные микропоры, затем — множественные микропоры, цепочки пор и далее микро- и макротрещины. Установлено, что в основном разрушение происходит при переходе к третьей стадии ползучести по растянутой зоне гибов паропроводов, имеющих микроповрежденность в виде микро- и макротрещин [1].

Цель работы — исследование влияния ВТО на микроструктуру длительно отработавших паропроводов из стали 15Х1М1Ф.

Материалы и методы исследований. Исследования проводили в условиях опытного производства на гибах паропроводов из стали 15Х1М1Ф типоразмеров ∅219×25 и ∅273×32 мм, прошедших эксплуатацию на ТЭС в течение 200...250 тыс. ч при параметрах пара: t = 550 °С, p = 13 МПа. Из паропроводов были вырезаны два представительных гиба.

Отработку режимов ВТО осуществляли на макетных участках. Каждый такой макетный участок (гиб) состоял из одного гнутого и двух прямых участков. Одну часть каждого макетного гиба исследовали до проведения ВТО, т.е. непосредственно после эксплуатации, а вторую — подвергали ВТО по различным режимам для оценки влияния ВТО на структуру и механические свойства металла и выбора оптимального режима.

Схема разрезки макетных гибов из стали 15Х1М1Ф для исследования структуры и свойств металла до и после ВТО представлена на рис. 1.

Для выполнения ВТО макетных гибов предложена технология индукционного нагрева подвижным индуктором. Для проведения нагревов был создан экспериментальный участок, снабженный электроэнергией и подачей воды, на котором была размещена установка МИТ-100 для термической обработки токами средней частоты 2400 Гц подвижным водоохлаждаемым индуктором. Размеры индуктора: диаметр 30 мм, длина 25 м. В комплект установки входит шкаф запуска, преобразователь ВПЧ-100-2400, постовое устройство и пульт управления.

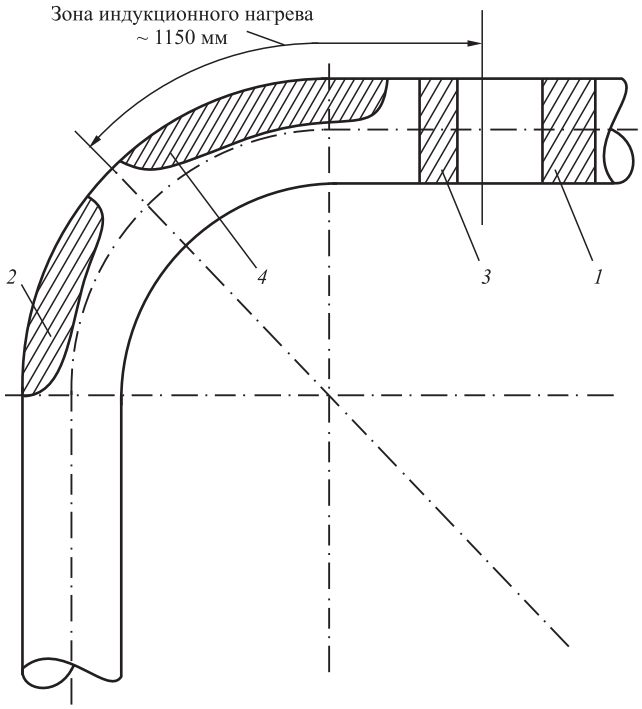


Рис. 1. Схема разрезки макетных гибов из стали 15Х1М1Ф для исследования структуры и свойств металла до и после ВТО:

1, *3* — места вырезки образцов из прямых участков гибов до и после ВТО соответственно; *2*, *4* — места вырезки образцов из растянутой зоны гибов до и после ВТО соответственно

Установка МИТ-100 оснащена устройствами, позволяющими осуществлять нагрев при проведении ВТО в автоматически заданном температурном режиме. Температуру при нагревах контролировали по показаниям термопар, установленных на нагреваемых участках с записью режимов на диаграммных лентах.

Макетные участки были установлены на опоры, исключающие их провисание. К концам макетных участков были приварены фальштрубы, с которых начинали и на которых заканчивали проведение нагревов.

Были разработаны технологические мероприятия, позволяющие продвигать индуктор по гибу без временной изоляции. При этом достигается ускоренное и регулируемое охлаждение каждого нагреваемого участка трубы. Создана специальная оснастка для крепления и передвижения индуктора по гнутым и прямым участкам макетных гибов.

При отработке режимов ВТО первоначально исходили из режимов штатной термической

обработки новых труб из стали 15Х1М1Ф при их изготовлении: нормализация при температуре 950...980 °С с последующим отпуском при 720...750 °С, время выдержки 1...3 ч, охлаждение на воздухе. Существенным является то, что при штатной термической обработке проводится печной нагрев труб, а в данной работе предложен индукционный способ нагрева труб.

При выборе режимов учитывали, что после длительной эксплуатации в условиях ползучести сталь 15Х1М1Ф содержит крупные, насыщенные легирующими элементами и термически устойчивые карбиды, содержащие хром и молибден, а также карбиды и карбонитриды ванадия VC и VCN. Температура нормализации при проведении ВТО должна быть такой, чтобы все карбиды перешли в твердый раствор аустенита.

Для выбора оптимального режима в процессе нагревов проводили экспресс-контроль микроструктуры гибов по сколам, снятым с их поверхности. По результатам исследований установили, что при индукционном нагреве применяемым оборудованием оптимальной является температура нормализации 1050...1080 °С для обоих исследуемых типоразмеров труб, что превышает температуру нормализации паропроводных труб при поставке согласно ТУ 14-3Р-55—2001.

ВТО макетных участков проводили в следующей последовательности по следующим режимам:

1) однократная нормализация при температуре 1070...1080 °С, охлаждение на воздухе; время выдержки при нормализации устанавливали в зависимости от толщины стенки трубы из расчета: 1 мин на 1 мм толщины стенки плюс 5...6 мин. При более длительных выдержках в указанном интервале температур может произойти резкий рост зерна, что нежелательно.

На основании экспресс-контроля микроструктуры по сколам установили, что в интервале температур фазовых превращений 1000...500 °С скорость охлаждения при нормализации должна составлять не менее 6...12 °С/мин. При этом гарантируется образование оптимальной феррито-бейнитной микроструктуры, отвечающей требованиям ТУ 14-3Р-55—2001.

2) отпуск при температуре 740 °С, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе.

Предварительные измерения показали, что при нагревах разница температур наружной и внутренней поверхностей труб макетного участка не превышала 10 °С.

Химический состав материала гиба контролировали до ВТО методом стилоскопирования. Сплошность изучали до ВТО методом *ультразвукового контроля* (УЗК).

Микроструктуру материала гиба до и после ВТО исследовали сначала на сколах, снятых с растянутой зоны гибов, а затем — на поперечных шлифах, изготовленных из вырезок по всей толщине стенки прямых и растянутой зоны гнутых участков макетных гибов. Микроструктуру выявляли химическим травлением реактивом: 3...4 %-ный раствор азотной кислоты на спирту и исследовали на световом микроскопе "Неофот-32" при увеличениях 100 и 500.

Микроповрежденность порами ползучести оценивали неразрушающим методом по репликам, снятым со шлифов, изготовленных на поверхности растянутой зоны гибов. Для этого непосредственно на вершине растянутой зоны гиба с помощью переносных шлифовальных кругов изготовляли микрошлифы, затем их многократно травили химическим реактивом и переполировывали специально для выявления пор ползучести, затем с поверхности шлифов снимали реплики. Микроструктуру материала исследовали с помощью переносного микроскопа. Затем реплики переносили в лабораторию, где с помощью стационарного микроскопа "Неофот-32" изучали микроструктуру и оценивали микроповрежденность порами ползучести при увеличении 500.

Испытания механических свойств проводили на поперечных цилиндрических образцах, изготовленных из вырезок, взятых с прямых участков и из растянутой зоны гибов, при температурах 20 и 550 °С.

Образцы на растяжение изготовляли по ГОСТ 1497—84, образцы для испытания на ударный изгиб — по ГОСТ 9454—78 с U-образными надрезами. Испытания на ударный изгиб проводили при 20 и 550 °С.

Результаты и их обсуждение. Результаты стилоскопирования показали, что материал обоих макетных гибов соответствует стали 15Х1М1Ф в соответствии с требованиями ТУ 14-3Р-55—2001 (табл. 1).

При контроле сплошности материала макетных гибов методом УЗК недопустимых дефектов, препятствующих проведению ВТО, обнаружено не было.

Поскольку растянутые зоны гибов паропроводов — наиболее опасные участки, то показательными являются результаты восстановления микроструктуры и механических свойств на этих участках.

Микроструктура материала макетных гибов на прямых и гнутых участках после длительной эксплуатации (до ВТО) феррито-карбид-

1. Химический состав гибов из стали 15Х1М1Ф после длительной эксплуатации, % мас.

Типоразмер труб, мм	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
							Не более	
∅219×25	0,13	0,30	0,4	1,10	0,9	0,25	0,018	0,019
∅273×32	0,14	0,33	0,5	1,2	1,0	0,28	0,02	0,018

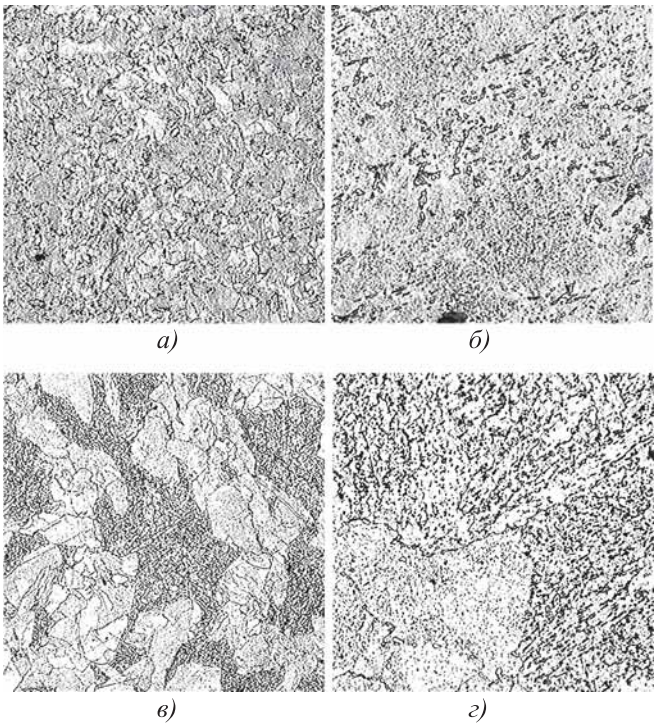


Рис. 2. Характерные микроструктуры гибов ∅219×25 и ∅273×32 мм из стали 15Х1М1Ф до (*а*, *б*) и после ВТО (*б*, *в*):
а, *в* — × 100; *б*, *г* — ×500

ная, при этом крупные глобулярные карбиды расположены по границам зерен. Такая структура считается браковочной.

После проведения ВТО исследовали микроструктуру по всей толщине стенки прямых участков и в растянутой зоне макетных гибов. На рис. 2 показаны характерные микроструктуры материала в растянутой зоне гибов с толщиной стенки 25 и 32 мм до и после ВТО.

В процессе ВТО произошла полная перекристаллизация и восстановление микроструктуры. После ВТО микроструктура феррито-бейнитная, бейнит имеет глобулярное строение и по своей морфологии его можно классифицировать как верхний бейнит. Количество участков отпущенного бейнита составляет 30...40 %, что соответствует 3—4-му баллу шкалы № 3 сдаточных микроструктур ТУ 14-3Р-55—2001 на трубы из стали 15Х1М1Ф при поставке.

Крупные глобулярные карбиды, расположенные по границам зерен, растворились, что привело к обогащению твердого раствора легирующими элементами. Размер зерна после ВТО увеличился от 8—9-го номера после длительной эксплуатации до 4—5-го после ВТО по шкале ГОСТ 5639—82. Сдаточная микроструктура, при этом крупные глобулярные карбиды расположены по границам зерен. Такая структура считается браковочной.

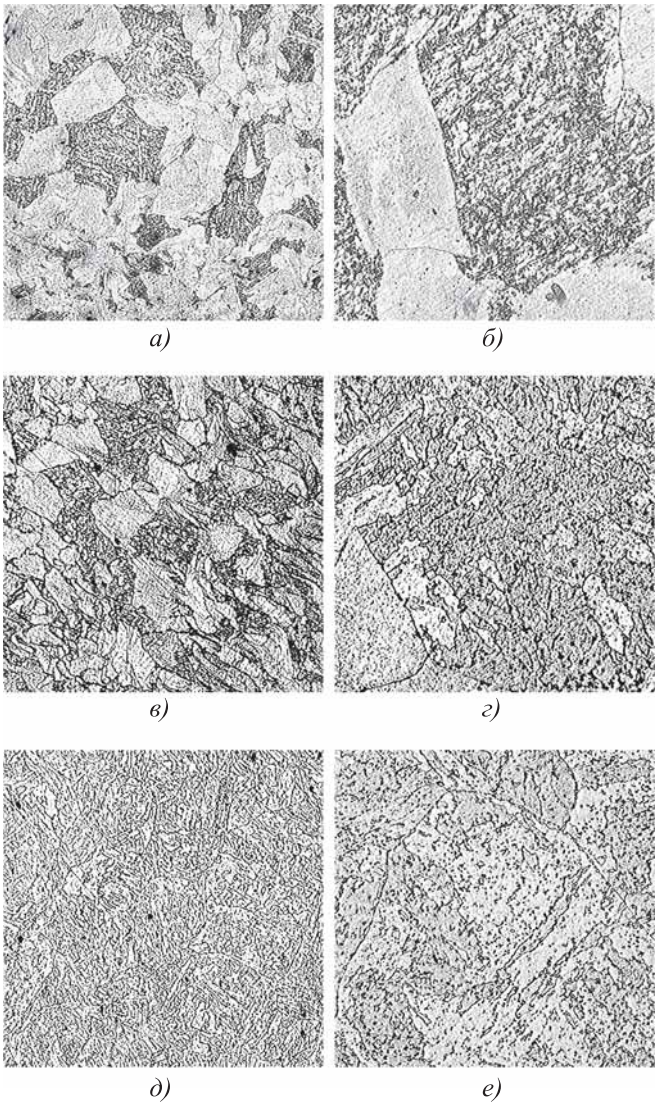
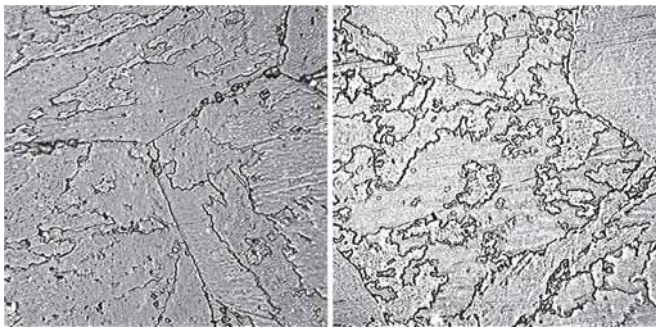


Рис. 3. Микроструктуры гибов из стали 15Х1М1Ф после ВТО по различным режимам:
а — скорость охлаждения в интервале 1000...600 °С ≈6 °С/мин; *б* — ≈8 °С/мин; *в* — ≈11 °С/мин; *а*, *в*, *д* — ×100; *б*, *г*, *е* — ×500



а) *б)*

Рис. 4. Микроповрежденность порами ползучести гибов из стали 15Х1М1Ф до (*а*) и после ВТО (*б*) (по репликам). ×500

тура образуется на прямых и гнутых участках исследуемых макетных гибов с толщиной стенки 25...32 мм и равномерно сохраняется по всей толщине стенки.

Исследования показали, что с повышением скорости охлаждения при нормализации от 6 до 12 °С/мин в интервале фазовых превращений 1000...600 °С количество бейнитных участков увеличивается, изменяется также их морфология, т.е. формируется более прочная и менее пластичная структура (рис. 3, *а—в*).

Разработанная технология позволяет подобрать температурные режимы ВТО для каждого трубного элемента паропровода в зависимости от его структурных особенностей и типоразмера труб, что гарантирует формирование сдаточной феррито-бейнитной микроструктуры 3—4-го балла для труб из стали 15Х1М1Ф по шкале № 3 ТУ 14-3Р-55—2001.

Микроповрежденность материала порами ползучести изучали по репликам, снятым со шлифов, изготовленных на растянутой зоне гибов. На рис. 4, *а* приведена характерная микроповреженность порами ползучести гибов после эксплуатации, где выявлены цепочки пор ползучести и полное отсутствие пор после проведения ВТО (рис. 4, *б*). Это свидетельствует о залечивании микроповрежденности, т.е. о процессе спекания микропор ползучести при нагревах в процессе проведения ВТО.

Результаты испытаний механических свойств образцов, вырезанных из растянутой зоны гибов, представлены в табл. 2.

Установлено, что после ВТО временное сопротивление разрыву $\sigma_в$ при комнатной температуре увеличилось на 45...62 Н/мм^2, а предел текучести $\sigma_{0,2}$ — на 52...87 Н/мм^2. При температуре 550 °С параметр $\sigma_в$ увеличился

2. Механические свойства макетных гибов из стали 15Х1М1Ф до и после ВТО*

Состояние металла	$T_{исп}$, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	*KC*U, Дж/см^2
		Н/мм^2		%		
Гиб ∅219×25 мм						
До ВТО (после эксплуатации)	20	565	285	15	46	37
	550	382	190	13	48	35
После ВТО	20	610	337	23	52	41
	550	410	239	—	54	42
Гиб ∅273×32 мм						
До ВТО (после эксплуатации)	20	553	258	14	44	37
	550	375	156	16	45	33
После ВТО	20	615	345	18	56	42
	550	405	256	17	55	44
По ТУ 14-3Р-55—2001 (при поставке)	20	490...686	314	Не менее		
				16	45	39

* Приведены усредненные значения по результатам испытаний трех образцов на одну точку.

на 28...62 Н/мм^2, а $\sigma_{0,2}$ — на 49...100 Н/мм^2. Характеристики пластичности (относительное удлинение и поперечное сужение) при комнатной и повышенной (550 °С) температурах после проведения ВТО остались практически без изменения.

Ударная вязкость материала макетных гибов после ВТО при комнатной температуре составляет *KC*U = 41...42 Дж/см^2, а при рабочей температуре 550 °С — 42...44 Дж/см^2, что отвечает требованиям ТУ 14-3Р-55—2001.

По всем нормируемым показателям кратковременные механические свойства металла макетных гибов после проведения ВТО отвечают требованиям ТУ 14-3Р-55—2001 на трубы из стали 15Х1М1Ф при поставке.

Результаты испытаний на растяжение показали, что после ВТО соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_в$ составляет 0,55...0,67, что отвечает требованиям по пластичности металла паропроводов. Соотношение временного сопротивления разрыву при рабочей и комнатной температурах $\sigma_в^{550}/\sigma_в^{20}$ не превышает 0,67...0,7, что отвечает требованиям по надежности металла паропроводов.

Выводы

1. Установлены оптимальные режимы проведения ВТО методом индукционного нагрева подвижным индуктором паропроводных труб и гибов из стали 15Х1М1Ф, прошедших длительную эксплуатацию в условиях ползучести.

2. После проведения ВТО происходит полное восстановление микроструктуры и механических свойств металла паропроводных труб до уровня требований ТУ 14-3Р-55—2001 на трубы из стали 15Х1М1Ф в состоянии поставки.

3. Положительные результаты проведения ВТО получены на гибах и прямых участках, вырезанных из паропроводов диаметром 219...273 мм, с толщиной стенки 25...32 мм после длительной эксплуатации в условиях ползучести при номинальных параметрах пара.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Швецова Т.А., Крейцер К.К.** Опыт применения восстановительной термической обработки паропроводов // Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы: сб. докладов науч.-техн. конф., 30 окт. — 2 нояб. 2006 г. М.: ОАО ВТИ, 2006. С. 116—120.

2. **Антикайн П.А.** Совершенствование технологии восстановительной термической обработки паропроводов из перлитных сталей // Теплоэнергетика. 1993. № 11. С. 1—6.

3. **Зислин Г.С., Каменская Н.И.** Восстановительная термическая обработка паропроводов ТЭС методом индукционного нагрева подвижным индуктором // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 10. С. 25—31.

Нина Иосифовна Каменская, канд. техн. наук,
kamenskaya5555@yandex.ru

УДК 621.7

А.Н. Петров[1], Б.А. Логинов[2], М.А. Петров[1], С.В. Мизера[1,3], Н.С. Балаклейский[2], А.Б. Логинов[4]

([1] Московский политехнический университет,
[2] Национальный исследовательский университет "МИЭТ",
[3] ООО "Коллоидно-графитовые препараты", г. Воскресенск,
[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

Методика исследования тонкой структуры коллоидно-графитовых пленок на поверхности стальных образцов с различной шероховатостью

Исследована тонкая структура коллоидно-графитовых пленок на поверхности стальных образцов с различной шероховатостью. Установлено, что шероховатость поверхности подложки (углеродистая сталь) влияет на микроструктурирование графитовых пленок.

Ключевые слова: шероховатость поверхности; коллоидно-графитовая пленка; сканирующая зондовая микроскопия; микрорельеф; тонкая структура; зонд микроскопа.

The fine structure of the colloidal-graphite films on the steel workpieces (substrates) with three types of roughness is studied. It is found that the roughness of the substrates influence on microstructuring of graphite films.

Keywords: surface roughness; colloidal-graphite film; scanning probe microscopy; scanning tunneling microrelief; fine structure; probe of microscope.

Известно, что в зависимости от локализации трения на контактной поверхности геометрия шероховатости образца изменяется. С другой точки зрения трение напрямую связано с контактным давлением. В самом простом случае давление представляет собой отношение силы к суммарной площади контактной поверхности для идеальной поверхности, т.е. отсутствуют волнистость и шероховатость поверхности. В зависимости от типа обработки поверхности можно получить различную шероховатость на ней. Поэтому в общем случае суммарное давление определяется как отношение суммы действующих сил $\left(\sum_{i=1}^{q} F_i\right)$ к площади, находящейся в контакте $\left(\sum_{j=1}^{m} s_j\right)$, которая находится между двумя соседними выступами или впадинами на определенной длине:

$$P = \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{\sum_{i=1}^{q} F_i}{\sum_{j=1}^{m} s_j} \right)_k , \qquad (1)$$

где q, i, n, m, k — порядковые индексы рассматриваемых неровностей на поверхности.

Известны пять основных типов поверхностной нелинейности [1—3]: макрошероховатость, волнистость, шероховатость, микро- или субшероховатость и наношероховатость. Наношероховатость представляет собой новую главу фундаментальных исследований, где область размеров эквивалентна размерам атомов.

Морфология неровностей поверхности зависит от технологий обработки. После фрезерования и токарной обработки неровности получают периодический профиль. После шлифования и эрозионной обработки поверхность имеет апериодический профиль. После операции обработки давлением поверхность от периодической изменяется на апериодическую. Шероховатость может быть измерена стандартными устройствами, работающими на индуктивном принципе (диапазон измерения до микрошероховатости), *микрокомпьютерная томография* (МКТ) [4] или сканирующие зондовые микроскопы (диапазон измерения до наношероховатости).

Как правило, результатом измерения являются графики, которые аппроксимируются полиномами высокой степени (от 6-й и выше), описывающие 2D-шероховатость (линейная шероховатость) или 3D-шероховатость (топо-

логическая карта). Включение в технологическую цепочку этих результатов является одной из задач по созданию цифрового производства для улучшения качества продукции. Однако даже при удачном проведении сканирования требуется разработать механизм расчета шероховатости в зависимости от постоянно изменяющейся поверхности в процессе ее обработки. По своей сложности задача сравнима с расчетом изменения (эволюции) микроструктуры в процессе деформирования или рекристаллизации. Решение этой задачи может быть получено *методом конечных элементов* (МКЭ).

В работе [5] рассмотрено изменение силы деформирования в зависимости от геометрии профиля линейной шероховатости, который описывается уравнением

$$y = A\sin\left(\frac{x}{F}\right), \qquad (2)$$

где A — первый коэффициент шероховатости, определяет амплитуду неровностей; F — второй коэффициент шероховатости, определяет период неровностей, а также в зависимости от наличия слоя *смазочного вещества* (СВ) для объемного материала.

Для титанового и алюминиевого сплавов наблюдается одна и та же тенденция: изменение силы деформирования в зависимости от профиля шероховатости поверхности (рис. 1, *а*). При появлении промежуточного слоя СВ между инструментом и заготовкой сила растет пропорционально уменьшению его толщины, что хорошо объясняется несжимаемостью жидкости (рис. 1, *б*).

Исследование влияния шероховатости и СВ на качество моделирования штамповки из листового материала рассмотрено в работе [6]. Без учета этих параметров ошибка расчета увеличивается и влияет на качество реального продукта. Для более достоверного моделирования в программе TriboForm были получены численные данные для заданной топографической карты поверхности листовой заготовки, которые затем имплементировались в программу AutoForm для расчета технологической операции листовой штамповки [6]. Учитывая, что рассматривается общий расход распределяемого смазочного вещества на поверхности заготовки ($m_{СВ}$), а топологическая карта характеризует шероховатость по поверхности исходного листа до нанесения СВ, в работе не учтено изменение шероховатости поверхности образца после нанесения СВ.

Для изучения этого изменения применяли современный сканирующий *зондовый микроскоп* (СЗМ). В отличие от электронной и оптической микроскопии с помощью СЗМ можно снимать кадры с одновременным измерением высоты рельефа в каждой точке кадра с точностью до 0,2 Å, фактически с точностью до отдельных атомов. Также СЗМ позволяет изначально получать кадры в цифровом формате, легком для распечатки и математического

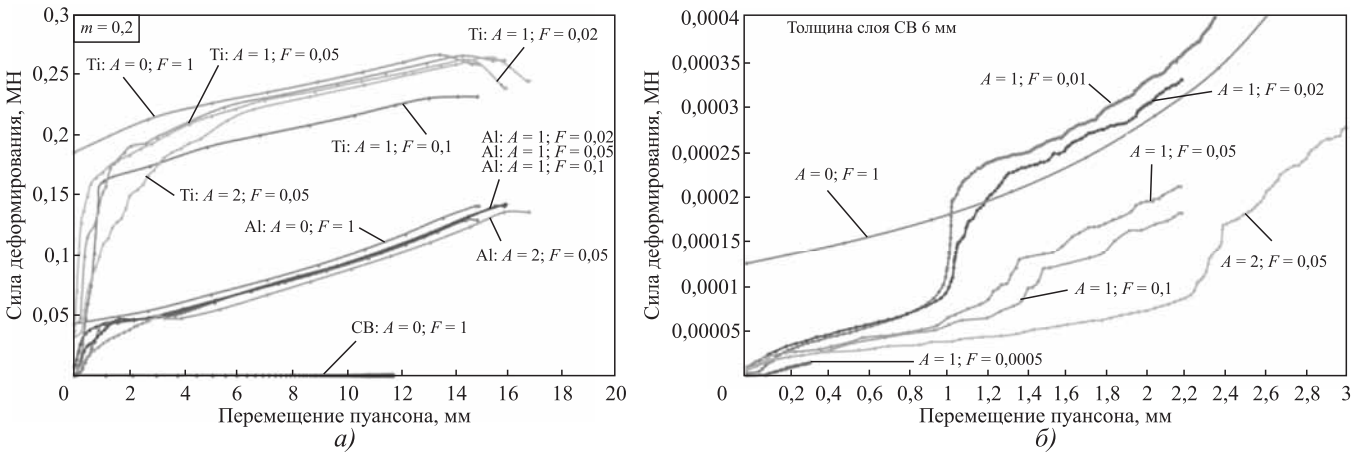
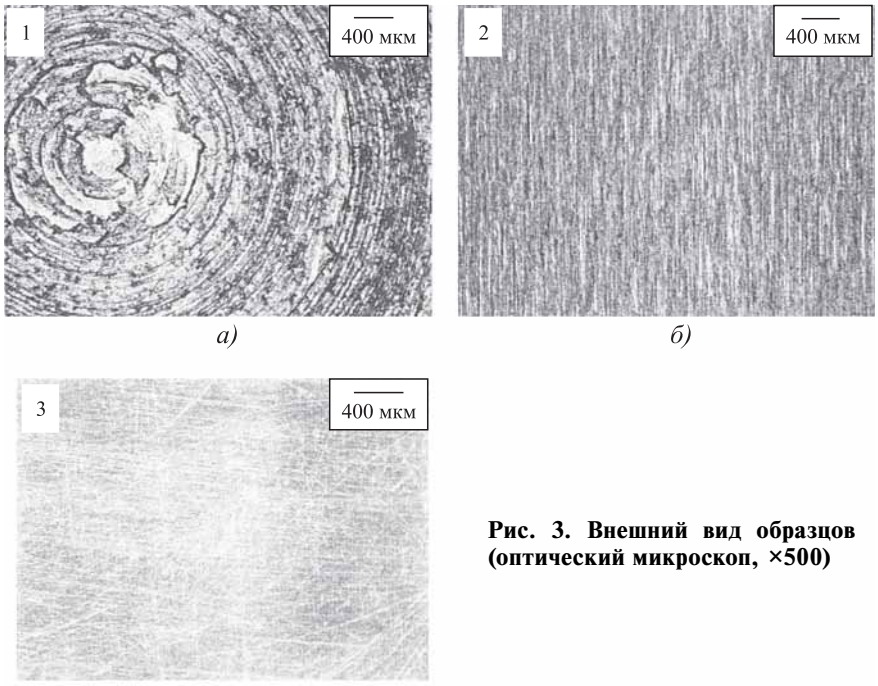


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования:
а — осадка цилиндрического образца [5]; *б* — осадка в щелевом штампе со смазкой [5]

анализа, и хорошо работает в диапазоне очень высоких увеличений, эквивалентных кратности электронных микроскопов в 1...10 млн крат с визуализацией отдельных атомов (размеры около 0,2 нм).

Методика отлично работает в области исследования морфологии и тонкой структуры зерен, в том числе и для порошковых материалов [7]. Широко распространенный в России серийный и входящий в Государственный реестр измерительных средств РФ сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000 имеет размер максимального кадра до 40×40 мкм и атомное разрешение (0,2 Å), выгодно отличаясь этим от других известных в мире микроскопов-аналогов сканирующего типа [8].



а) *б)* *в)*

Рис. 3. Внешний вид образцов (оптический микроскоп, ×500)

Влияние шероховатости поверхности на образование тонкой наноструктуры коллоидно-графитовой пленки, которую образуют коллоидно-графитовые СВ, широко применяющиеся в процессах горячего деформирования различных сталей и сплавов, исследовали на подготовленных стальных образцах. Образцы из углеродистой стали обрабатывали на металлорежущих станках для получения различной шероховатости (рис. 2):

— образец № 1 обтачивали на токарном станке черновым резцом;

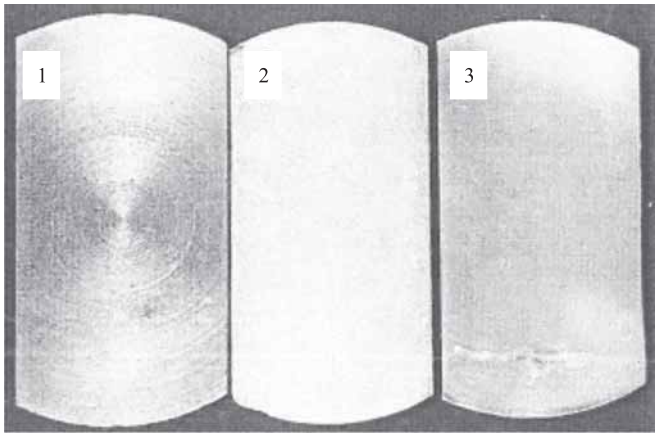


Рис. 2. Внешний вид образцов (стереомикроскоп)

— образец № 2 шлифовали после токарной обработки;

— образец № 3 полировали после токарной и шлифовальной обработки.

Общий вид образцов и вид поверхности под бинокулярным микроскопом показан на рис. 2. Микрорельеф поверхности образцов изучали на оптическом микроскопе. Соответствующие кадры показаны на рис. 3, на которых хорошо заметны следы механической обработки материала.

Поверхность образца № 1 матовая со следами грубой механической обработки. Поверхность образца № 2 имеет светлую блестящую поверхность со следами обработки шлифовальным кругом. На поверхности образца № 3 видны следы полировки и риски, расположенные хаотично.

Далее на поверхность образцов методом распыления наносили коллоидно-графитовый препарат ТВ-6 (ООО "Коллоидно-графитовые препараты, г. Воскресенск) со степенью разбавления концентрата водой в соотношении 1:3. Время нанесения составляло от 2 до 3 с. Образцы предварительно нагревали в электрической печи до температуры 200...250 °С.

Для исследования на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 образцы устанавливали на полимерную подложку, в которой были предусмотрены токопроводящие

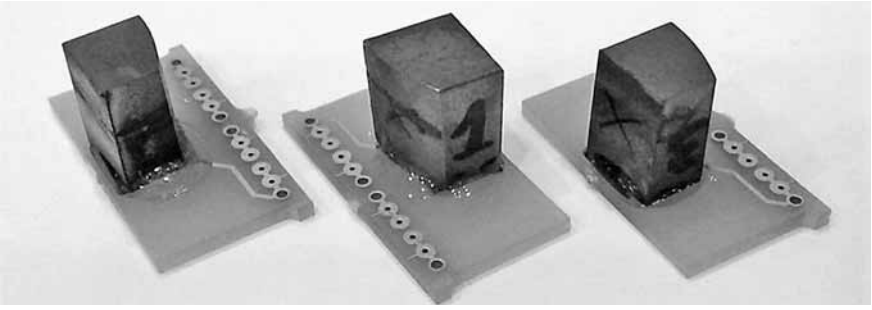


Рис. 4. Образцы, подготовленные для исследований на СЗМ СММ-2000

контакты, и фиксировали с помощью полимерной смолы (рис. 4).

Благодаря высокому увеличению СММ-2000 и соответствующему выбору размера получаемых кадров (1×1 мкм) на кадрах не видны в сотни раз большие по размерам следы механической обработки, а видна именно тонкая или наноструктура поверхности образцов. Ввиду наличия у образцов электрической проводимости они были доступны для изучения наиболее высокоразрешающим из множества имеющихся в микроскопе СММ-2000 методов — методом сканирующей туннельной микроскопии. С применением зондов в виде платиновых игл на исследуемых графитовых коллоидных пленках разрешающая способность в плоскости *XY* достигала ~0,5 нм, а по направлению оси *Z* она составила ~0,2 нм.

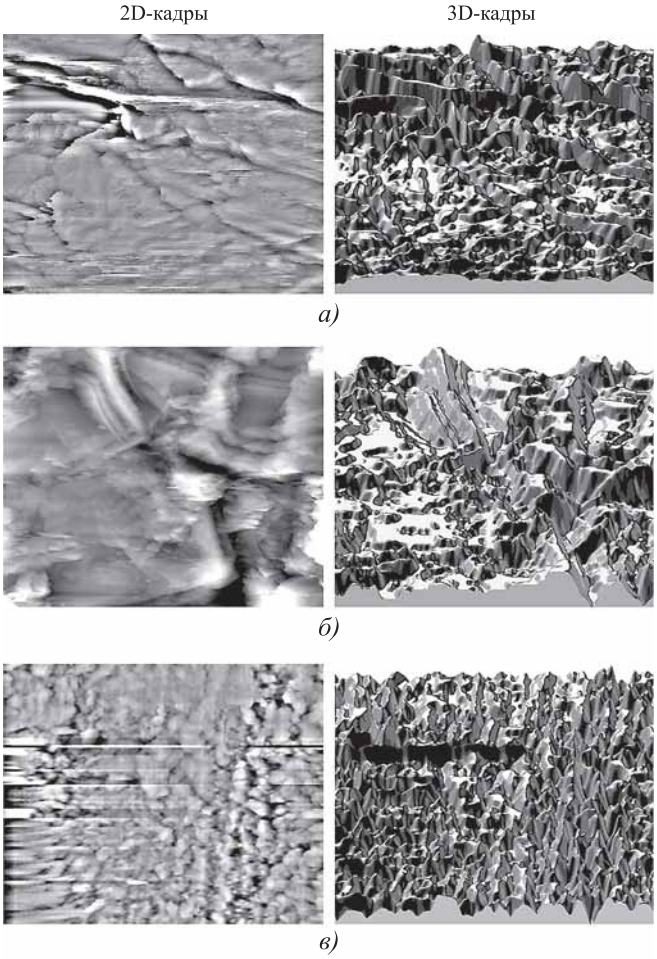


Рис. 5. Типовые рельефы поверхности образцов:
а — образец № 1 — после токарной обработки (*Ra* = 0,48 мкм); *б* — образец № 2 — после шлифования (*Ra* = 0,12 мкм); *в* — образец № 3 — после полирования (*Ra* = 0,08 мкм)

На рис. 5 приведены кадры размером 1×1 мкм, на которых хорошо видна тонкая наноструктура коллоидно-графитовой пленки с характерными размерами зерен 10...50 нм, по-разному складывающихся в микроструктуры, в зависимости от вида механической обработки поверхности образца.

В процессе исследований наблюдали частое образование на кадрах полос (одна из полос видна на 2D-кадре образца № 3, см. рис. 5), связанное с тем, что зонд микроскопа при сканировании "катает" незакрепленные частицы графита. В связи с этим иногда требовалось получить кадр повторно несколько раз, чтобы выбрать из них кадр без полос, что традиционно устраняется тем, что перед исследованием на образец вакуумными методами напыляется тончайшая, не закрывающая необходимые для наблюдения структуры, пленка графита толщиной 0,5...1 нм.

Заключение. Шероховатость исходных образцов влияет на микроструктурирование графитовых пленок, которые образуются на этом образце после нанесения на него коллоидно-графитового смазочного вещества.

Показана применимость новых методов сканирующей зондовой микроскопии для характеризации и исследований графитовых покрытий, образующихся при реализации технологических процессов обработки металлов давлением.

Для устранения эффекта "катания" частиц на поверхности исследуемого образца рекомендуется применять магнетронные установ-

ки предварительного напыления для закрепления имеющихся на поверхности образцов частиц смазочного вещества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чичинадзе А.В.** Основы трибологии. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
2. **Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А.** Исследование шероховатости и толщины теплозащитных покрытий для заготовок из никелевых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 4. С. 42—46.
3. **Smith G.T.** Industrial Metrology: surfaces and roundness. London: Springer-Verlag, 2002. 336 p.
4. **Kerckhofs G., Pyka G., Moesen M. et al.** High-resolution micro-CT as a tool for 3D surface roughness measurement of 3D additive manufactured porous structures // Advanced Engineering Materials. 2013. Vol. 15 (3). P. 153—158.
5. **Petrov M.A., Petrov A.N., Petrov P.A.** Numerical investigation of the material behavior due to friction during compression tests of the samples with non-uniform surface quality // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 716. P. 736—752.
6. **Hol J., Wiebenga J.H., Stock J. et al.** Carleer Improving stamping simulation accuracy by accounting for realistic friction and lubrication conditions: Application to the door-outer of the Mercedes-Benz C-class Coupé // Journal of physics: conference series. 2016. Vol. 734. 032091.
7. **Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А.** Разработка универсальной методики гранулометрического анализа металлических и неметаллических порошковых материалов, а также тонкой структуры зерен и процессов их агломерации // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 12. С. 36—43.
8. **Логинов Б.А.** Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия: учебно-метод. пособие. М.: МИФИ, 2008. 224 с.

Александр Николаевич Петров, д-р техн. наук,
alexander_petr@mail.ru;
Борис Альбертович Логинов;
Михаил Александрович Петров, канд. техн. наук;
Светлана Викторовна Мизера;
Николай Сергеевич Балаклейский;
Артем Борисович Логинов

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

СПРАВОЧНИК технолога-машиностроителя

в 2-х томах

Под ред. ***А.С. Васильева, А.А. Кутина***

Издание 6-е, переработанное и дополненное. 2018 г. 1574 с.

В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.

Цена 15 000 руб.

Том 1. Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

Том 2. Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизико-химическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

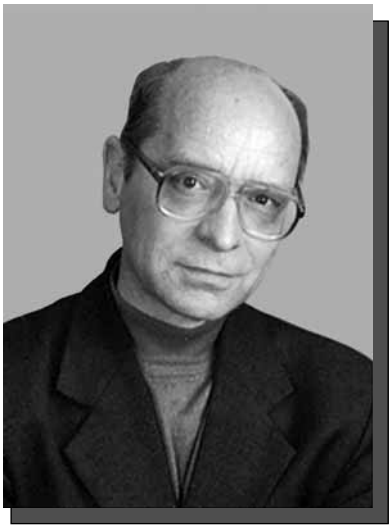
Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ
по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU

Памяти
Владимира Петровича Ступникова
(01.03.1954—07.03.2018)

7 марта 2018 г. на 65-м году жизни скоропостижно скончался заведующий кафедрой "Технологии обработки материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор, д-р техн. наук Владимир Петрович Ступников.



В.П. Ступников родился 1 марта 1954 г. в Москве. С 1971 по 1972 г. работал токарем-револьверщиком в производственном объединении "Электросвет". С 1972 по 1974 г. проходил службу в рядах Советской армии. В 1980 г. окончил кафедру "Машины и технология обработки металлов давлением" МВТУ им. Н.Э. Баумана.

С 1980 по 1999 г. работал в должностях инженера, научного сотрудника, заведующего лабораторией, доцента кафедры АМ-6 "Машины и технология обработки металлов давлением" (ныне кафедра МТ-6 "Технологии обработки давлением"). В это время В.П. Ступников являлся исполнителем по закрытым фундаментальным научно-исследовательским работам по созданию композиционных материалов специального назначения и разработке технологии и оборудования магнитно-импульсного деформирования ферропорошка.

В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 1992 г. ему было присвоено ученое звание доцента по кафедре. В 2000 г. Владимир Петрович был назначен заведующим кафедрой МТ-13 "Технологии обработки материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию на тему "Разработка технологии повышения качества изделий из компактных и порошковых материалов обработкой давлением с использованием импульсного магнитного поля".

В.П. Ступниковым было подготовлено более 100 научных и методических работ в области обработки металлов давлением, технологии конструкционных материалов и реновации средств и объектов материального производства в машиностроении.

Он являлся членом научно-методического совета Минобразования РФ, членом ученого совета научно-учебного комплекса "Машиностроительные технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Владимир Петрович более 40 лет своей жизни посвятил работе в родном Университете. Стиль его руководства отличался особой человеческой чуткостью к проблемам сотрудников, аспирантов и студентов.

Светлая память о Владимире Петровиче навсегда сохранится в сердцах его друзей, коллег и учеников.

Коллектив редакции и редакционный совет журнала выражают глубокие соболезнования родным и близким Владимира Петровича Ступникова.

ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение**", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 03.04.2018. Подписано в печать 26.04.2018. 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.