ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 10 октябрь 2013

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

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

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И., к.т.н.
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
БОГАТОВ А.А., д.т.н., проф.
БОКОВ А.А., к.т.н.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н.
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., к.т.н., доц.
КАСАТКИН Н.И., д.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., к.т.н., доц.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПАСЕЧНИК Н.В., д.т.н.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н. проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
СУБИЧ В.Н., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШЕСТАКОВ Н.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯКОВЛЕВ С.С., д.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing.habil.,prof.
ТУТМАН Т., Dr.Jur.
ЭРКСЛЕБЕН С., Dr.-Ing.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ЛУТОВИНИНА О.Н.
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Изотов В.А., Родионова Н.А. Определение оптимальной скорости заполнения полости литейной формы при изготовлении тонкостенных отливок по газифицируемым моделям 3
Грачев А.Н., Кошелев О.С., Леушин И.О., Леушина Л.И., Маслов К.А. Шлам селитровых ванн термических цехов – перспективный материал для литейно-металлургического производства 6
Шолохов М.А., Гончаров С.Н., Бровко В.В., Полосков С.И. Выбор состава электродной проволоки для обеспечения служебных свойств соединений при сварке высокопрочных сталей по узкому зазору 9

Кузнечно-штамповочное производство

Мерабишвили М.О. ОАО "Тяжмехпресс" – лидер по выпуску кузнечно-прессового оборудования 15
Соков В.И., Крук А.Т., Новокщенов Л.Т. Кривошипный горячештамповочный пресс мод. К8052 номинальной силой 165 МН 19

Прокатно-волочильное производство

Поворов С.В. Исследование эффекта переформовки, возникающего при профилировании листового металла в роликах 26

Материаловедение и новые материалы

Гвоздев А.Е., Шкатов М.И., Лукин А.С. Эволюция микроструктуры при развитии динамической рекристаллизации в процессе горячей прокатки конструкционных сталей 31
Петросян А.С., Гукасян В.С. Технологические особенности получения армированного композиционного материала на основе Fe–Mo–S 34
Потапов А.И., Батуева Е.А. Сопротивление деформации кремнемарганцовистых сталей для арматуры 38

Информация

Додин Ю.С., Сигаев Н.П. Анализ диаграммы процесса прессования алюминиевой тубы или баллона 41
Некрасова Е.О., Харитонов В.А. Использование компьютерного моделирования для анализа процесса винтовой протяжки заготовки из высокоуглеродистой стали 44

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

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

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

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2013

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and other productions)

№ 10 October 2013

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

This issue prepared with assistance of specialists:
LUTOVININA O.N.
SERIKOVA E.A.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Izotov V.A., Rodionova N.A. Determination of optimal mould cavity filling speed in manufacture of thin-walled casting by molding on installed gas models 3
Grachev A.N., Koshelev O.S., Leushin I.O., Leushina L.I., Maslov K.A. Saltpeter bath sludge of heat-treating shops as promising material for foundry and metallurgical industry 6
Sholokhov M.A., Goncharov C.N., Brovko V.V., Poloskov S.I. Choice of electrode wire composition for providing of joints service properties at high-strength steels welding through narrow gaps 9

Forging and Stamping Productions

Merabishvili M.O. JSC "Tyazhmekhpress" – leader in production of press-forging plant 15
Sokov V.I., Kruk A.T., Novokshchenov L.T. Hot-stamping crank press (K8052 model) by nominal capacity of 165 MN 19

Rolling and Drawing Productions

Povorov S.V. Research of remolding effect arising at profiling of sheet metal in rollers 26

Physical Metallurgy and New Materials

Gvozdev A.E., Shkatov M.I., Lukin A.S. Microstructure evolution in development of dynamic recrystallization during hot rolling of structural steels 31
Petrosyan A.S., Gukasyan V.S. Technological features of obtaining of reinforced composite material based on Fe–Mo–S 34
Potapov A.I., Batueva E.A. Flow stress of silico-manganese steels for armature . . . 38

Information

Dodin Yu.S., Sigaev N.P. Chart analysis pressing process of aluminium tube or bottle 41
Nekrasova E.O., Kharitonov V.A. Using of computer simulation for analysis of screw passing process of blank from high-carbon steel 44

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

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2013

УДК 621.74.041

В.А. Изотов, Н.А. Родионова
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева)

Определение оптимальной скорости заполнения полости литейной формы при изготовлении тонкостенных отливок по газифицируемым моделям

Приведены зависимость загрязненности отливок типа "плита" от критерия Рейнольдса, обеспечивающая выбор максимально допустимой скорости заполнения полости формы, а также математическая зависимость для выбора минимально допустимой скорости заполнения полости формы, позволяющие определить оптимальную скорость заполнения полости формы и по ней рассчитать исполняемые размеры литниковой системы.

Ключевые слова: литье по газифицируемым моделям; минимально и максимально допустимая скорость заполнения полости формы; газовая пористость; критическое значение критерия Рейнольдса.

The dependence of impurity of castings type "plate" from Reynolds criterion for choice of maximum possible mould cavity filling speed, and also mathematic dependence for choice of minimum possible mould cavity filling speed are presented. These dependences allow to determine the optimal mould cavity filling speed and by it to calculate executable sizes of gating system.

Keywords: moulding on installed gas models; minimum and maximum possible filling speed; gas porosity; critical value of Reynolds criterion.

При изготовлении тонкостенных отливок из углеродистых сталей по газифицируемым моделям используют достаточно высокие скорости заполнения полостей форм. При этом продукты деструкции материала модели могут захватываться расплавом, особенно при условии турбулентности потока. В результате в отливках появляется дефект "газовая пористость". Выбор необходимых скоростей заполнения тонкостенных полостей форм затруднен, так как при недостаточной скорости может возникнуть дефект "спай". Таким образом, актуальными задачами являются определение оптимальной скорости заполнения полости формы и выбор необходимого типа литниковой системы для определения зоны заполняемости полости литейной формы, которая ограничивается максимально допустимой скоростью заполнения при отсутствии турбулентности потока и минимально допустимой скорости заполнения, которая ограничивается охлаждением фронта потока и возникновением дефекта "спай". Выбрав оптимальную скорость заполнения полости формы, определим исполняемые размеры литниковой системы.

Для определения правой границы заполняемости полости литейной формы, т.е. оптимально возможной скорости, осуществляли заливку экспериментальных блоков, состоящих из пластин различной толщины $\delta = 6$; 8 и 10 мм (схема блока представлена на рис. 1). Длина пластин $l = 300$ мм, ширина $b = 100$ мм.

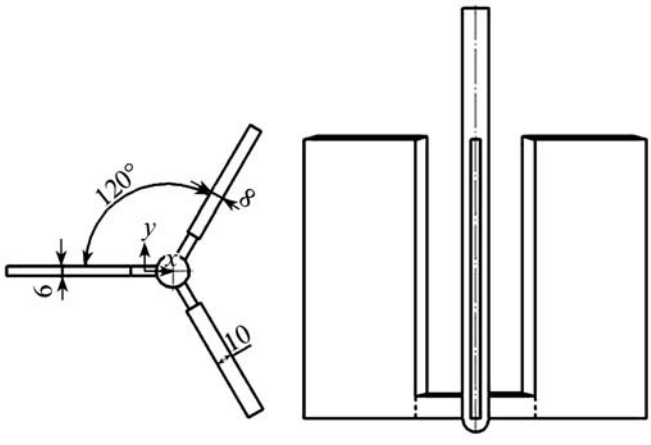


Рис. 1. Схема экспериментального блока

Рис. 2. Залитый блок

Заливку блока проводили из стали марки 35Л, температура заливки 1580 °С, разрежение в форме 50 кПа. Блок после заливки и выбивки показан на рис. 2.

Загрязненность отливки оценивали отношением площади газовых включений к площади поверхности пластины, на которой они расположены, по формуле

$$Z = \frac{S_{\text{г.п}}}{S_{\text{пл}}}. \qquad (1)$$

Опытная отливка с газовыми дефектами на фрезерованной поверхности приведена на рис. 3.

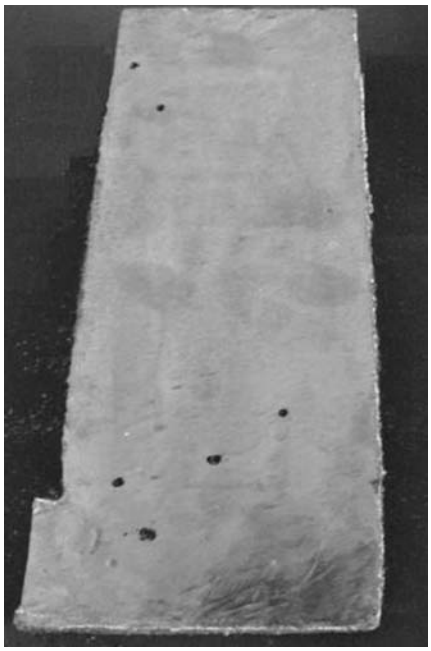


Рис. 3. Пластина с газовыми включениями

1. Степень загрязненности пластин газовыми дефектами

Толщина пластины δ, мм	Скорость заполнения полости формы расплавом ω, м/с	Степень загрязненности поверхности пластин Z, 10^{-4} %
6	0,05	0,045
8		0,110
10		0,100
6	0,035	0,030
6 (подвод металла с торца)	0,022	0,024

Результаты по определению степени загрязненности пластин представлены в табл. 1.

Для определения оптимально допустимой скорости заполнения полости формы воспользуемся оценкой турбулентности потока с помощью критерия Рейнольдса по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega l_0}{\upsilon}, \qquad (2)$$

где l_0 – приведенный размер отливки, мм, $l_0 = \delta / 2$;

υ – кинематическая вязкость расплава, м^2/с.

Результаты расчета приведены в табл. 2.

По результатам экспериментальных данных построена зависимость загрязненности отливок типа "пластина", залитых из стали 35Л, газовыми дефектами от критерия Рейнольдса (рис. 4) и определено его критическое значение $\mathrm{Re}_{\text{кр}}$.

Для определения максимально допустимой скорости заполнения полости формы необходимо рассчитать приведенные размеры полости литейной формы и знать критическое значение Re.

Используя ранее полученную математическую зависимость (рис. 5) [1]:

$$\mathrm{Nu}_{\delta ж} = 9{,}9\,\mathrm{Pe}_{\delta ж}^{0{,}16} - 14{,}6; \quad R = 0{,}99; \quad R^2 = 0{,}98; \quad \mathrm{Pe}_{\delta ж} < 70, \qquad (3)$$

2. Значения критерия Рейнольдса для различных пластин

Толщина пластины δ, мм	Скорость заполнения полости формы расплавом ω, м/с	Критерий Рейнольдса Re
6	0,05	300
8		400
10		500
6	0,035	210
6 (подвод металла с торца)	0,022	132

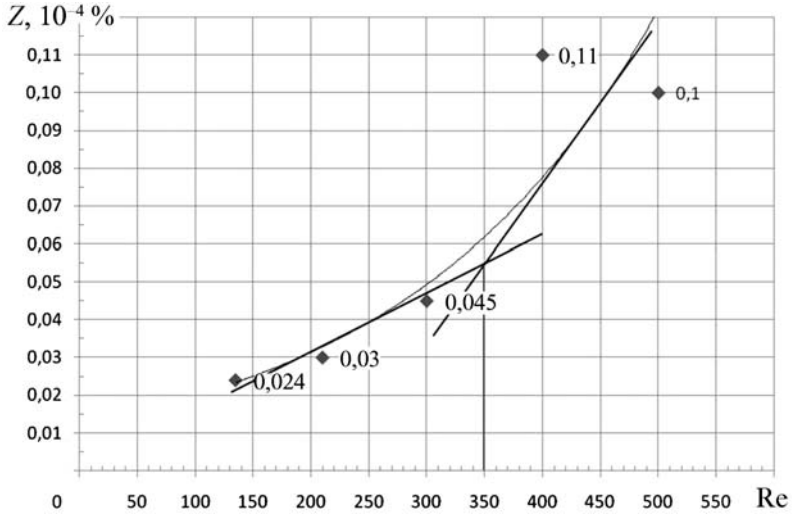


Рис. 4. Зависимость загрязненности пластин газовыми дефектами *Z* от числа Рейнольдса Re

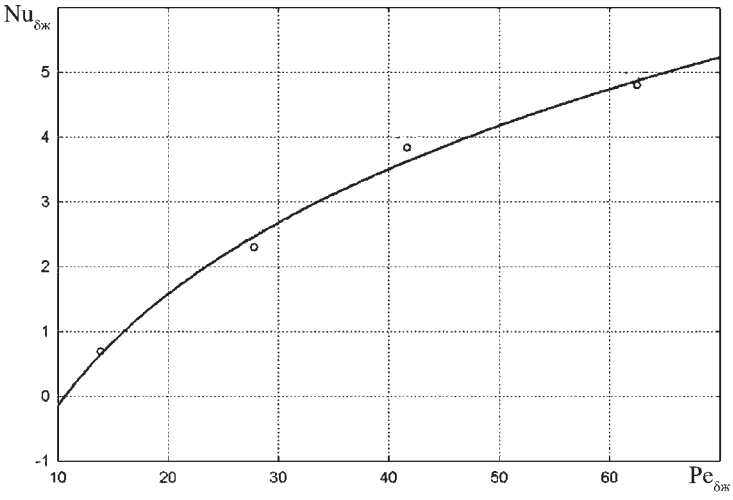


Рис. 5. Зависимость критерий Нуссельта $Nu_{\delta ж}$–критерий Пекле $Pe_{\delta ж}$

где R – коэффициент корреляции; R^2 – коэффициент детерминации.

Вычислим минимально допустимую скорость заполнения полости формы [2]:

$$\omega = \frac{y}{\frac{c\,\rho\,l_0}{\alpha}\left(1+\frac{b_м}{b_ф}\right)\ln\frac{T_{зал}-T_{ф.н}}{T_л-T_{ф.н}}}, \qquad (4)$$

где y – длина пути пройденного фронтом потока расплава (высота отливки), м; c – удельная теплоемкость сплава в жидком состоянии, Дж/(кг·К); ρ – плотность сплава в жидком состоянии, кг/м^3; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К); $b_м$ – коэффициент теплоаккумулирующей способности, Вт·с^{0,5}/(м^2·К); $b_ф$ – коэффициент теплоаккумулирующей способности формы; $T_{зал}$ – температура заливки, К; $T_л$ – температура ликвидус, К; $T_{ф.н}$ – начальная температура формы, К.

Таким образом, оптимальную скорость заполнения необходимо выбирать из области, ограниченной минимальной и максимальной скоростями, а затем рассчитать исполняемые размеры литниковой системы. Если область заполняемости стремится к нулю, то следует сменить тип литниковой системы.

Заключение. Полученные зависимости позволяют определить исполняемые размеры литниково-питающей системы, обеспечивающие отсутствие дефектов на стадии заполнения полости литейной формы расплавом при литье по газифицируемым моделям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Родионова Н.А., Изотов В.А.** Охлаждение фронта потока в полости литейной формы при литье по газифицируемым моделям // Материалы 4-й Всероссийской науч.-техн. конф. "Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства". Самара, 2012.

2. **Изотов В.А., Акутин А.А., Равочкин А.С.** Технология литейной формы. Литье в песчаные формы: учеб. пособие. Рыбинск: РГАТА им. П.А. Соловьева, 2011. 116 с.

Владимир Анатольевич Изотов, д-р техн. наук,
iva_111k@mail.ru;
Наталья Александровна Родионова

УДК 621.74

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

Шлам селитровых ванн термических цехов – перспективный материал для литейно-металлургического производства*

Показана перспективность использования шламов селитровых ванн термических цехов в литейно-металлургическом производстве. Рассмотрены варианты применения данного материала для решения задач, связанных с экономией основного сырья и предотвращением загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: шлам селитровых ванн; утилизация отходов; техногенный отход; рециклинг; литейно-металлургическое производство.

Prospects for using saltpeter bath sludges of heat-treating shops in the foundry and metallurgical industry is shown. Variants of utilizing this material for solvution of tasks related to saving of basic raw materials and preventing environmental contamination are considered.

Keywords: saltpeter bath sludge; waste utilization; technogenic waste; recycling; foundry and metallurgical industry.

В настоящее время проблемы утилизации отходов промышленных производств становятся все более актуальными в связи с интенсивно ухудшающейся экологической обстановкой и постоянно растущими производственными затратами.

Отходы производства – фактор, воздействующий на окружающую природную среду и отрицательно влияющий на качество жизни человека. Однако их применение, например, в качестве вторичных материальных ресурсов выгодно с экономической точки зрения и позволяет успешно решать ряд таких важных хозяйственных задач, как экономия основного сырья, предотвращение загрязнения водоемов, почвы и воздушного бассейна, увеличение объемов производства изделий, производство новой для предприятий продукции [1].

Практика показывает, что основная масса всех образующихся техногенных отходов (отходы металлургии, машиностроения, горной промышленности, энергетики, химических и других производств, доля которых с каждым годом возрастает) не может быть переработана (утилизирована) на тех предприятиях, где данные отходы образуются.

Все большее распространение получает практика использования отходов смежных отраслей. При этом особая роль при решении данной проблемы отводится, в частности, литейно-металлургическому производству – основной заготовительной базе машиностроения. Предприятия машиностроения, имеющие в своей структуре литейные цеха, так же как и предприятия "большой металлургии", в состоянии с высокой эффективностью утилизировать большинство отходов самых различных отраслей, включая даже бытовые отходы [2].

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева это направление считается приоритетным, а его сотрудниками в течение последних десятилетий активно проводятся научные исследования в этой области применительно к проблемам предприятий региона. Предметом данной статьи является проблема рециклинга (повторное использование отходов в той или иной технологии после дополнительной обработки [3]) шлама селитровых ванн – одного из многочисленных техногенных отходов предприятий машиностроения.

В цехах термической обработки часто применяют селитровые ванны. Детали, подготовленные после проведения закалки к операции отпуска, погружают в расплав солей ($NaNO_3$, KNO_3), нагретый до 430...550 °С, и выдерживают (в зависимости от типа и материала деталей). Выше указанных температур селитры разлагаются и вступают в химическое соединение с железом (из материала деталей и самих ванн). При этом реакции сопровождаются выделением большого количества тепла, которое может вызвать взрыв.

После охлаждения детали помещают в специальный бак с водой в целях их охлаждения и промывания от остатков солей. Соответственно, в баке с течением времени накапливаются техногенные отходы двух видов: водный раствор натриевой (калиевой) селитры и придонный осадок (шлам, относящийся к отходам 3-го класса опасности). Состав отхода (по данным Управляющей компании предприятий Группы "ГАЗ") приведен в таблице.

Перед отправлением на утилизацию проводят окончательное разделение водного раствора селитры и придонного осадка. Годовые объемы образования

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

Состав отхода

Наименование	Содержание, %
Нефтепродукты	0,073
Свинец	0,003
Цинк	0,030
Медь	0,053
Никель	0,090
Железо	9,790
Марганец	0,098
Нитрат натрия	60,093
Окалина	29,800
Всего	100

этих отходов существенны, а затраты на их утилизацию высоки.

Авторами статьи поставлена задача определения возможных малозатратных вариантов применения указанных отходов в литейно-металлургических технологиях, не требующих их значительного изменения и использования специального оборудования.

При данном подходе отходы рассматриваются как полупродукты производства, представляющие собой потенциально ценный исходный материал для применения в литейных технологиях.

Предложены следующие варианты использования водного раствора селитры (полупродукт А):

А1. Рециклинг селитр для повторного применения в соляных ваннах при проведении термической обработки.

Данный вариант предполагает добавление водного раствора селитры в соляные ванны, содержащие "первичные" $NaNO_3$ или KNO_3, которые подвергаются расплавлению при нагреве. В результате обеспечиваются снижение затрат на проведение захоронения отходов и экономия исходных продуктов.

А2. В качестве технологической добавки в составе экзотермических смесей для обогрева прибылей стальных и чугунных отливок.

Ввод селитры обеспечивает стабильное горение смеси, а также позволяет регулировать температуру ее воспламенения. Предложенный вариант использования отхода способствует сокращению брака по усадочным раковинам, поскольку благодаря наличию в составе отхода нитрата калия и нитрата натрия – активных окислителей – появляется дополнительный источник кислорода для прохождения экзотермической реакции. Итогом является повышение эффективности теплового воздействия на прибыльную зону отливки при ее использовании для стального и чугунного литья [4].

А3. Очистка деталей и заготовок от окалины и пригара в щелочно-селитровых ваннах (расплавах солей и щелочей).

Сущность способа очистки деталей и заготовок в расплаве солей заключается в том, что отложения нагара в расплаве полностью окисляются, а накипь в результате объемных и структурных изменений компонентов, которые ее составляют, разрушается. Одновременно удаляются продукты коррозии и окалина. Детали получают пассивирующую обработку – на поверхности материала деталей или заготовок создается защитная оксидная пленка.

Технологический процесс очистки включает в себя четыре операции: обработку в расплаве, промывку в проточной воде, травление в кислотном растворе и вторую промывку в горячей воде [5].

А4. В литье по выплавляемым моделям (ЛВМ):

А4.1. В качестве технологической добавки в составе материала оболочковой формы ЛВМ.

Предлагаемый вариант предусматривает введение в состав материала керамической оболочки водного раствора селитры, представляющего собой кислородсодержащее вещество. Добавление определенного количества кислородсодержащего вещества позволяет интенсифицировать процессы удаления остатков модельной композиции и обеспечить выделение тепла экзотермических реакций для повышения спекаемости оболочковых форм и термодеструкции связующего материала оболочки в ходе проведения операции прокаливания форм перед подачей их на заливку металлическим расплавом.

Достижение более полного сгорания остатков модельной композиции способствует сокращению брака по газовым раковинам. В результате за счет снижения температурного максимума и времени пребывания форм в прокалочной печи сокращаются энергозатраты на операцию прокаливания оболочковых форм, а также длительность производственного цикла изготовления отливок в целом.

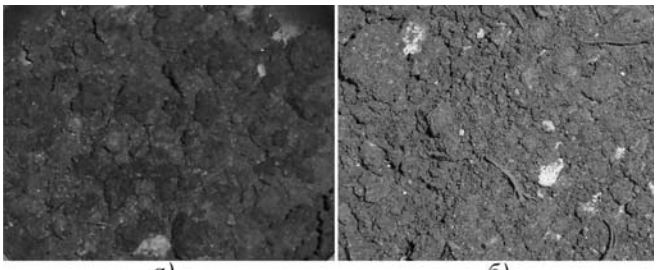
А4.2. Помещение оболочковой формы в насыщенный раствор селитры в воде после выплавки модельного состава перед прокаливанием [6].

Данная операция способствует повышению эффективности удаления модельной композиции из полости оболочковой формы, обеспечит снижение брака по газовым раковинам и позволит повысить энергоэффективность операции прокаливания.

Для придонного осадка (полупродукт Б), в составе которого содержатся главным образом оксиды железа (см. рисунок), предложены следующие три варианта его использования в литейно-металлургических технологиях:

Б1. В качестве наполнителя в составе противопригарных покрытий для стального литья.

Пригар представляет собой слой на поверхности отливки, состоящий из оплавившихся частиц формовочных материалов, пропитанных основным сплавом, оксидами его компонентов и продуктами их взаимодействия с составляющими формовочной смеси, способствующий формированию грубой, шероховатой поверхности отливки.



а) *б)*

Придонный осадок:
а – до сушки; *б* – после высушивания

На образование пригара также оказывает влияние неравномерность уплотнения смеси в форме и использование крупнозернистого песка. Предупредить образование пригара можно применением облицовочных смесей с повышенной огнеупорностью, покрытием рабочей поверхности формы припылами (графит, тальк, пылевидный кварц и т.д.) или литейными красками. Предложено введение в состав противопригарного покрытия полупродукта переработки шламов селитровых ванн (оксидов железа) для создания так называемого легкоотделимого пригарного слоя, что позволит обеспечить дополнительную защиту от пригара литья в сырые формы [7].

Б2. В составе экзотермических смесей для улучшения работы прибылей стальных и чугунных отливок.

Экзотермические смеси, имеющие в своем составе в качестве основных функциональных компонентов порошок алюминия и оксиды железа, позволяют обогревать прибыли, обеспечивая высокую эффективность питания отливок и повышение технологического выхода годного. Источником выделяющейся теплоты при этом служит реакция окисления алюминия. Этот вариант обеспечивает снижение массы прибылей (по сравнению с необогреваемыми) в 2,5–4,0 раза и снижение себестоимости годных отливок.

Б3. В качестве компонента шихты при ваграночной плавке чугуна.

Добавка к полупродукту переработки шламов селитровых ванн жидкого стекла позволит изготовлять шликер и далее топливные брикеты, которые впоследствии можно будет помещать в вагранку для прохождения реакции взаимодействия с углеродом при получении чугуна.

Таким образом, разработка методов нейтрализации и повторного использования отходов промышленных производств является одной из важнейших задач обеспечения экологической безопасности. К таким методам, в частности, относится рециклинг отходов селитровых ванн предприятий машиностроения.

Проведенный анализ вариантов возможного применения отходов селитровых ванн термических цехов позволяет сделать вывод о том, что данный материал является перспективным для применения в различных литейно-металлургических технологиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бобович Б.Б., Девяткин В.В.** Переработка отходов производства и потребления. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 496 с.

2. **Кудрин В.А.** Теория и практика производства стали: учеб. для вузов. М.: Мир, ООО "Издательство АСТ", 2003. 528 с.

3. **Голубев О.В.** Металлургические методы переработки промышленных и бытовых отходов. Ч. 1. Образование и проблемы переработки твердых бытовых отходов: учеб. пособие. М.: МИСиС, 2005. 79 с.

4. **Пат. 2369461 РФ.** Экзотермическая смесь для обогрева прибылей стальных и чугунных отливок / А.И. Беляков, А.А. Беляков, П.А. Борсук и др. Опубл. 10.10.2009.

5. **Строительные** материалы и оборудование: справочник. Режим доступа: http://stroy-technics.ru/article/ochistka-detalei-v-rasplavakh-solei (дата обращения: 08.04.2013).

6. **А.с. 829316 СССР.** Способ прокалки керамических форм, получаемых по выплавляемым моделям / Б.А. Кириевский, Н.В. Шипулин, В.В. Чихачев и др. Опубл. 15.05.1981.

7. **Технология** литейного производства: учеб. / Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, С.Г. Майзель и др.; под ред. Б.С. Чуркина. Екатеринбург: Урал. гос. проф.-пед. ун-т, 2000. 662 с.

Александр Николаевич Грачев, канд. техн. наук;
Олег Сергеевич Кошелев, д-р техн. наук;
Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук;
Любовь Игоревна Леушина;
Константин Александрович Маслов,
канд. техн. наук,
lmps@nntu.nnov.ru

УДК 621.791:539.4.

М.А. Шолохов *(ООО "Шторм", г. Екатеринбург),*
С.Н. Гончаров *(ОАО "Уралтрансмаш", г. Екатеринбург),*
В.В. Бровко, С.И. Полосков *(ФГАУ НУЦ "Сварка и контроль" при МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Выбор состава электродной проволоки для обеспечения служебных свойств соединений при сварке высокопрочных сталей по узкому зазору

На основе уравнений регрессионной модели по расчету механических свойств литого металла сварных соединений проведен выбор оптимального состава сварочной проволоки, обеспечивающей равнопрочность сварных соединений высокопрочных сталей без применения послесварочной термообработки. В качестве альтернативного варианта присадочной проволоки выбран наиболее близкий вариант промышленно выпускаемой сварочной проволоки. Для выбранных вариантов проволоки выполнена проверка механических свойств сварных соединений с проведением натурного эксперимента по сварке с использованием серийно изготовляемых сварочных проволок. Результаты экспериментов подтвердили достоверность выполненных расчетов.

Ключевые слова: сварные соединения; механические свойства; присадочная проволока; высокопрочная сталь; зауженная щелевая разделка.

On the base of regression model equations for calculation of welding joints cast metal mechanical properties choice of optimal welding wire composition, that provide welding joints uniform strength for high-strength steel welding without use welding joints heat processing after welding, is carried out. In the capacity of alternative version of filler wire is chosen the closest version of industry produces welding wire. Welding joints mechanical properties test for chosen wire versions is carried out with holding natural experiment welding with use commercially manufactured welding wires. Experiment results confirmed the accuracy of the calculations.

Keywords: welding joints; mechanical properties; filler wire; high-strength steel; narrow gaps.

Высокопрочные стали, традиционно применяемые для изготовления сварных корпусов специальной техники, отличаются высокой чувствительностью к термическому циклу сварки, которая проявляется в склонности к образованию закалочных структур в сварном шве.

Для оптимизации служебных свойств сварных соединений из этих сталей разработана технология двухдуговой сварки, наиболее эффективная при формировании шва по узкому зазору (щелевой разделке) [1–3]. Однако, как показали расчеты, даже с рациональным использованием эффекта самоотпуска, характерного для многодуговой сварки, сложно обеспечить одновременное исключение образования закалочных структур как в металле шва, так и зоне термического влияния (ЗТВ).

В работе [4] определено оптимальное тепловложение при сварке по узкому зазору, при котором обеспечиваются требуемые служебные свойства металла в околошовной зоне, и показано, что при существующих технологиях и применяемых материалах (низкоуглеродистые и низколегированные сварочные проволоки) можно улучшить свойства сварного шва без ухудшения свойств ЗТВ.

Одним из путей решения данной проблемы является рациональное легирование металла шва введением в него необходимых элементов с каплями электродного металла. Однако конкретный состав и содержание элементов, переходящих в шов при сварке по узкому зазору, и их влияние на свойства шва до сих пор не определены.

Цель работы – определение состава и содержания легирующих элементов электродной проволоки для дуговой многопроходной сварки высокопрочных сталей по узкому зазору (щелевой разделке).

В настоящее время для изготовления сварных корпусов специальной техники применяют высокопрочные стали типа 20ХГСНМ и 25ХГ2С2НМА. Химический состав данных марок сталей приведен в табл. 1.

Служебные свойства сталей оценивают по следующим основным параметрам механических свойств: пределу прочности $\sigma_в$; пределу текучести $\sigma_т$; относительному удлинению δ; относительному сужению ψ; ударной вязкости *KC*U; твердости по Виккерсу HV.

Параметр твердости не относится к основным параметрам служебных свойств сварного соединения, однако он является основным корреляционным параметром определения склонности к образованию закалочных структур в сварных швах и поэтому его также широко применяют при оценке служебных свойств сталей и сварных соединений.

Механические свойства сталей, используемых в специальной технике, приведены в табл. 2.

При производстве корпусных конструкций специальной техники традиционно применяют сварочные

1. Химический состав сталей, используемых в специальной технике

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
20ХГСНМ	0,20... 0,25* / 0,23	0,35 ... 0,60 / 0,51	1,25 ... 1,50 / 1,38	≤ 0,03 / 0,016	≤0,03 / 0,015	1,0... 1,5 / 1,28	0,4 ...0,8 / 0,63	0,1 ...0,3 / 0,19
25ХГ2С2НМА	0,22 ...0,28 / 0,25	1,10 ...1,50 / 1,37	1,25 ...1,50 / 1,41	≤0,035 / 0,022	≤0,035 / 0,016	0,2 ... 0,7 / 0,6	0,4 ... 0,9 / 0,6	0,1 ... 0,3 / 0,20

* В числителе приведено допустимое содержание элемента, а в знаменателе – фактическое среднее значение.

2. Механические свойства высокопрочных сталей

Марка стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	*KC*U, МДж/м^2	HV, МПа
20ХГСНМ	1500...1300	900...950	10...13	0,5...0,9	510...365
25ХГ2С2НМА	1500...1300	920...970	7...10	0,4...0,7	525...380

проволоки, которые обеспечивают свойства сварного шва и ЗТВ, сходные с основным металлом.

Для определения оптимального химического состава электродных проволок, в максимальной степени улучшающих свойства сварного шва без ухудшения свойств ЗТВ, проведен сравнительный анализ основных преимуществ и недостатков ранее использованных для сварки высокопрочных сталей 20ХГСНМ и 25ХГ2С2НМА низкоуглеродистых и низколегированных сварочных проволок: Св-08Г2С, Св-10ГСМТ (Св-08ГСМТ), Св-08Х3Г2СМ и Св-08Х20Н9Г7Т.

Преимуществами проволоки Св-08Г2С являются высокая технологичность, проявляющаяся в низкой склонности к образованию закалочных структур, высокая распространенность проволоки, а ее основной недостаток – недостаточная прочность получаемого сварного шва.

Главным преимуществом проволоки Св-10ГСМТ (Св-08ГСМТ) является более высокая в сравнении с предыдущей проволокой прочность сварного шва, а ее недостатки – более высокая склонность к образованию закалочных структур и более низкая ударная вязкость соединений.

Проволока Св-08Х3Г2СМ обеспечивает еще более высокое значение прочности сварного шва, но при этом еще более чувствительна к термическому циклу процесса сварки, так как содержит хром в значительном количестве.

Проволока Св-08Х20Н9Г7Т позволяет получить достаточно прочный, состоящий преимущественно из аустенита, состав наплавленного металла. Недостатками данной проволоки является неоднородный по сравнению с основным металлом химический состав.

Известно [5], что на основании расчетных данных можно оценить влияние на механические свойства сварного соединения элементов, поступающих в сварочную ванну с электродной проволокой. Такой расчет в соответствии с методическим подходом работы [5] базируется на использовании уравнений регрессионной модели для определения временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения, оценки ударной вязкости. Уравнения модели учитывают время нахождения металла в температурном интервале мартенситного распада от 850 до 500 °С и позволяют оценить влияние отдельных элементов, вводимых в сварной шов, на его механические свойства.

Согласно уточненным уравнениям модели работы [5] оценено влияние отдельных элементов, вводимых в сварной шов, на его механические свойства. Для удобства анализа влияния присадочных элементов на механические свойства в табл. 3 приведены расчетные коэффициенты основных химических элементов отдельно для каждого элемента, процентное содержание которых обозначено общепринятым химическим обозначением.

Следует отметить, что углерод С существенно повышает прочность сварного соединения, но снижает его пластичность и с точки зрения образования закалочных структур его содержание рационально установить на уровне 0,1 %.

Марганец Mn положительно влияет на свойства, повышая прочность соединения, почти не снижая пластичности, однако его содержание не может превышать пределов растворимости на уровне 2 %.

Кремний Si почти не влияет на механические свойства шва, поэтому его введение необходимо только для компенсации выгорания марганца при сварке и не должно превышать пределов растворимости на уровне 1 %.

Сера S и фосфор P – это примесные элементы, ухудшающие свариваемость и увеличивающие склонность к образованию холодных трещин, поэтому их содержание в металле шва должно быть минимальным.

Хром Cr является элементом, повышающим прочность сварного шва при некотором снижении пластичности, поэтому его использование в качестве легирующего элемента оправдано, однако введение его

в количестве более 1 % способно значительно ухудшить свариваемость.

Никель Ni в целом положительно влияет на механические свойства сварного шва и, что особенно важно, он значительно улучшает свариваемость и способен компенсировать негативное влияние многих элементов на свойство сталей, однако введение его на уровне более 3...4 % связано со значительным повышением стоимости присадочных материалов.

Содержание молибдена Mo, по представленным в табл. 3 расчетным коэффициентам, также ограничено значением 1 %.

Ванадий V положительно влияет на повышение прочности сварного соединения, но его содержание в стали не может превышать 0,3 %, так как большее содержание приводит к образованию карбидов, снижающих ударную вязкость соединения.

Для обеспечения различных технологических требований в сварочные проволоки вводятся дополнительные химические элементы [6], поэтому был проведен анализ их влияния на свойства металла шва.

Расчетные коэффициенты некоторых дополнительных химических элементов, вводимых в сварочные проволоки, приведены в табл. 4 отдельно для каждого элемента.

Установлено, что введение титана, алюминия, ниобия не целесообразно с точки зрения механических свойств, однако их совместные добавки в небольших количествах способствуют измельчению структуры сварных швов, что благоприятно влияет на свариваемость [7].

Полезной добавкой может быть наличие вольфрама и меди на уровне допустимых примесей, но и они не способны существенно улучшить свойства шва. Совместное введение марганца, молибдена, никеля, хрома, меди снижает температуру полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$-превращения и тормозит его, что способствует формированию бейнитной структуры и является бла-

3. Расчетные коэффициенты для основных легирующих элементов

Параметр	Общее слагаемое	Коэффициенты легирующих элементов								
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V
$\sigma_в$	+350	+1720C (+170Mn + +1330Cr + +870Cr– –160Mo + +310Ni – –694V)C +86C^2	+171Mn (+170C – –23,5Ni)Mn –17Mn^2	–23,6Si +64,5CrSi –	–	–200P –	+202Cr (+1330C + +870C + +64,5Si – –43Mo – –25,5V)Cr –50Cr^2	+97Ni (+310C + +23,5Mn + +16,1V)Ni +5,4Ni^2	+147Mo (+160C + +43Cr – –20,7Ni – –50,7V)Mo –4,5Mo^2	+426V (–694C + + 25,5Cr + +16,1Ni – –50,7Mo)V –255V^2
		–(23,0+290C+3Mn+2,5Si+14Cr–13Mo+10,8Ni+13V) lnτ (1)								
$\sigma_т$	+290	+1660C (–32,3Mn + +712Si + +291Ni + +470V)C –161C^2	+164Mn (–32,3C – –24,1Ni)Mn –31,3Mn^2	+17,4Si (+712C + +65,1Cr – –64,2Ni + +201V)Si –	–	1200P –	+103Cr +65,1SiCr –	+92Ni (+291C– –24,1Mn – –64,2Si + +15,3V)Ni –4,5Ni^2	+190Mo (–24Ni – –59,2V)Mo –15Mo^2	+324V (+470C + +201Si + +15,3Ni – –59,2Mo)V –275V^2
		–(27,5+350C+4,1Mn+4,3Cr+3,4Mo+2,2Ni+6,6V) lnτ (2)								
δ	+38,2	–103C (+9,2Mn + +11Cr + +20Mo)C +78C^2	–3,94Mn (+9,2C – –1,1Si + +1,64Mo)Mn –	+1,61Si –1,1MnSi –	–18S –	–18P –	–8,59Cr (+11C + +0,577Ni)Cr 0,27Cr^2	– +0,577CrNi+ + 0,826MoNi –	–9,0Mo (+20C + +1,64Mn + +0,826Ni + +3,86V)Mo +0,686Mo^2	–20,6V +3,86MoV +2,12V^2
		+(8,4C+0,905Cr–0,596Ni+4,9V–2P) lnτ (3)								
ln[*KCU*(*T*)]	+0,41	– – –11,5C^2	+1,56Mn –0,196NiMn +0,051Mn^2	–1,57Si –	–	–7,25P –	–0,877Cr –	– –0,196MnNi+ +0,253VNi –	–1,98Mo – –0,220Mo^2	–4,55V +0,253NiV 0,533V^2
		+(0,386–0,70C–0,514Mn+0,415Si+0,217Cr+0,703Mo–0,120Ni+0,715V–8,1N–3,44O) lnτ + +(0,0183–0,034C–0,0018Mn–0,0024Mo+0,0025Ni–0,0069V) T+0,0039T lnτ (4)								

Обозначения: τ – длительность охлаждения металла с 850 до 500 °C; T – температура образца металла, при которой проводили испытания на ударную вязкость.

4. Расчетные коэффициенты для дополнительных легирующих элементов

Параметр	Коэффициенты легирующих элементов								
	Ti	Al	Nb	W	Cu	Zr	N	O	Co
$\sigma_в$	–310	–70	–65	+57	+43	–7	+1900	–90	–
$\sigma_т$	–120	–90	–32	+13	+40	+960	+1740	–110	–
δ	+12,4	–	+0,478	–	–0,85	–	–103	–18,5	+2,43
*KC*U	–8,9	–	+0,97	–0,11	+0,03	+15,4	–4,8	–3,2	–

гоприятным фактором механических свойств и свариваемости сталей.

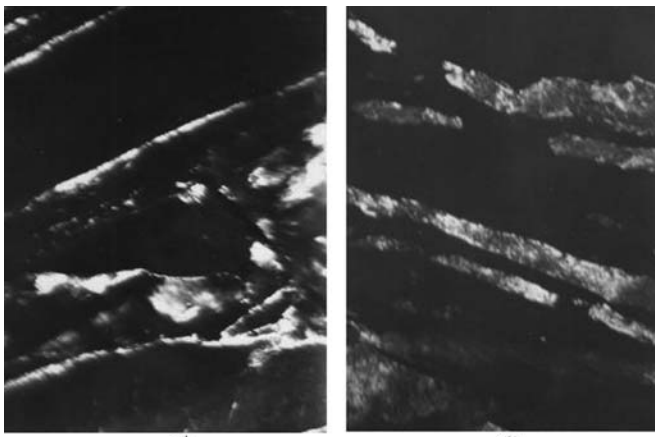
Введение азота влияет на механические свойства стали приблизительно так же, как и влияние углерода. Однако вопрос легирования металла азотом связан с возможностью обеспечения равномерности его распределения в металле шва. Кислород негативно влияет на все механические свойства сварного шва, что требует применения специальных мер по дополнительному раскислению металла в процессе сварки.

Введение циркония имеет смысл на уровне микролегирования (нескольких сотых долей процента), поскольку он является очень активным раскислителем, способным снизить нежелательное содержание кислорода в сварном шве.

На основании представленных коэффициентов и известного влияния элементов на свариваемость можно определить оптимальный состав литого металла по всем представленным элементам. Таким образом, расчетный состав металла шва по основным элементам должен быть примерно следующим: 0,12 % C; 2 % Mn; 1 % Si; 1 % Cr; 3 % Ni; 0,6 % Mo; 0,3 % V.

Значительное количество никеля в составе шва обеспечивает наличие мягких прослоек остаточного аустенита в структуре шва, что компенсирует хрупкость закалочных структур в металле шва и повышает стойкость сварных швов против образования горячих трещин. Состав высокопрочных сталей подобран так, чтобы между слоями мартенситных структур присутствовали полоски пластичного остаточного аустенита.

На рис. 1 приведены включения остаточного аустенита (светлые прослойки) в стали 20ХГСНМ, они присутствуют в стали в состоянии поставки, а при быстром охлаждении с высоких температур толщина прослоек и общее количество аустенита увеличиваются.



а) *б)*

Рис. 1. Субмикроструктура стали 20ХГСНМ (×22 000):
а – металл в состоянии поставки; *б* – основной металл, подвергнутый интенсивному термическому воздействию по термическому циклу околошовной зоны сварного соединения

Известно [8], что доля участия основного металла в сварном шве на уровне 40 %. Исходя из этого, химический состав присадочного материала по основным элементам должен быть следующим: 0,06 % C; 2 % Mn; 1 % Si; 1 % Cr; 4 % Ni; 0,8 % Mo; 0,3 % V.

В качестве проверки точности выбора материала с использованием выражений (1)–(4) (см. табл. 3) был выполнен проверочный расчет прочности и механических свойств литого металла шва, результаты которого представлены в табл. 5.

При выполнении расчета приняли $\tau = 24$ с, доля основного металла в соединении 40 %.

Расчетный состав присадочной проволоки способен обеспечить равнопрочность сварного соединения.

5. Расчетные значения состава и свойств литого металла шва

Материал	Химический состав шва, %							Механические свойства				
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	φ, %	*KC*U, МДж/м^2
Сталь 20ХГСНМ, сваренная проволокой расчетного состава	0,128	1,40	1,15	1,11	2,65	0,56	0,18	1253	1018	12,5	51,1	1,62

6. Расчетные значения состава и свойств литого металла шва с использованием проволоки OK Autrod 13.31

Материал	Химический состав шва, %							Механические свойства				
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	φ, %	*KC*U, МДж/м^2
Сталь 20ХГСНМ, сваренная проволокой OK Autrod 13.31	0,152	1,40	1,03	0,75	1,51	0,44	0	920	772	16,2	55,3	1,26

Поскольку ни одна из отечественных и зарубежных марок проволок полностью не соответствует приведенному химическому составу, был предпринят поиск ближайших аналогов. Так, проволока OK Autrod 13.31 производства ESAB (0,1 % C; 2 % Mn; 0,8 % Si; 0,4 % Cr; 2,1 % Ni; 0,6 % Mo) в большей степени соответствует рекомендуемому составу, чем промышленно выпускаемые проволоки других производителей.

По данным изготовителя проволоки, механические свойства наплавленного проволокой OK Autrod 13.31 металла следующие: предел прочности 890 МПа, предел текучести 850 МПа, относительное удлинение 17 %, в то же время известно, что предел прочности металла, наплавленного проволокой Св-08Г2С, не превышает 600 МПа.

В качестве проверки возможности применения проволоки OK Autrod 13.31 при производстве корпусных конструкций был выполнен проверочный расчет прочности и механических свойств литого металла шва, результаты которого представлены в табл. 6.

Как видно из табл. 6, проволока OK Autrod 13.31 способна обеспечить достаточно высокую прочность литого металла, приближающуюся к прочности высокопрочных сталей, и может быть рекомендована в качестве временной в связи с отсутствием проволоки специального состава.

Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Оценка технологических преимуществ предлагаемых проволок была выполнена путем расчета углеродного эквивалента по общепринятой формуле

$$C_э = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + \\ + (Cu + Ni)/15 + Si/24 + 15B. \quad (5)$$

Расчетное значение $C_э$ для ранее используемой наиболее прочной проволоки Св-08Х3Г2СМ составило 1,145, для проволоки предложенного состава $C_э = 0,84$, а для OK Autrod 13.31 – $C_э = 0,79$. Результаты расчета наглядно показывают технологические преимущества предлагаемых материалов.

В целях практической проверки полученных результатов было выполнено опытное исследование свойств металла шва. Для этого осуществляли сварку пластин из высокопрочной стали по узкому зазору с использованием проволоки OK Autrod 13.31.

Применяли сварочную установку, состоящую из механизма перемещения горелки Noboruder NB-5H, сварочного аппарата S5 Pulse ШТОРМ-LORCH (рис. 2).

Образцы для механических испытаний из литого металла сварного шва вырезали из верхней части шва (рис. 3) (тип образца II и VII по ГОСТ 6996).

Механические испытания показали практическое совпадение расчетных и полученных механических свойств. Предел прочности при испытаниях натурных образцов составил 1300...1550 МПа, предел текучести

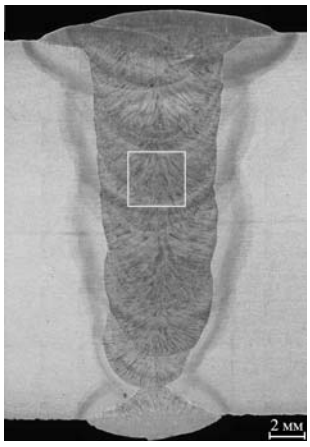


Рис. 3. Схема вырезки образцов из металла шва, полученной при сварке по узкому зазору

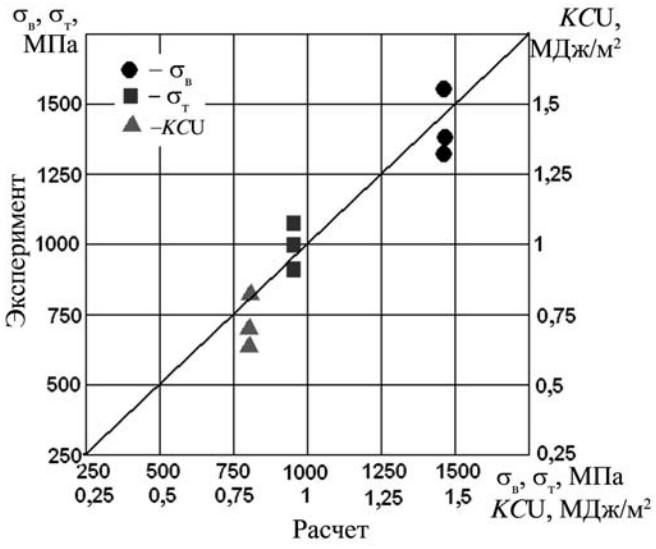


Рис. 4. Диаграмма рассеяния экспериментальных и расчетных значений механических свойств сварного соединения

850...1100 МПа, относительное удлинение 14,0... 16,5 %, ударная вязкость 1,30...1,55 МДж/м^2.

Результаты оценки по диаграммам рассеяния экспериментальных и расчетных данных механических свойств сварного соединения, проведенной в соответствии с рекомендациями работы [9], приведены на рис. 4.

Таким образом, определены состав и содержание легирующих элементов электродной проволоки для многопроходной сварки по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники, обеспечивающей помимо высокой прочности сварных соединений и ряд других свойств, важнейшим из которых является способность литого металла шва останавливать вязкое разрушение – трещиностойкость, обеспечиваемое оптимальным химическим составом шва.

Выводы

1. Ранее использованные при сварке высокопрочных сталей марок 20ХГСНМ и 25ХГ2С2НМА сварочные проволоки по ГОСТ 2246–70 (Св-08Г2С, Св-10ГСМТ (Св-08ГСМТ), Св-08Х3Г2СМ) не обеспечивают оптимальные свойства литого металла сварных соединений без проведения послесварочной термообработки или обладают низкой технологичностью.

2. Расчетным методом определен оптимальный состав наплавленного металла, обеспечивающего высокие механические свойства, а также надлежащую свариваемость и, соответственно, состав присадочной проволоки, учитывающей участие доли основного металла в образовании сварного шва.

3. Ни одна из известных марок проволоки не соответствует предложенному составу. Наиболее близкой к предложенному составу является состав присадочной проволоки OK Autrod 13.31 производства ESAB, которая обеспечивает выполнение требований по механической прочности металла шва на нижнем уровне значений прочности для основного металла высокопрочных сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сравнительный** анализ способов дуговой сварки закаливающихся сталей в щелевую разделку / Д.А. Чинахов, В.Т. Федько, О.Г. Брунов, Ю.Н. Сараев // Изв. Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 2. С. 192–195.

2. **Моделирование** особенностей формирования шва при сварке плавящимся электродом по узкому зазору / М.А. Шолохов, В.А. Ерофеев, И.Э. Оськин, С.И. Полосков // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 11–16.

3. **Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И.** Компьютерный анализ особенностей заполнения разделки при двухдуговой сварке плавящимся электродом по узкому зазору // Сварка и диагностика. 2013. № 3.

4. **Инженерный** анализ влияния параметров двухдуговой сварки высокопрочных сталей по узкому зазору на свойства сварного соединения / М.А. Шолохов, В.А. Ерофеев, С.Н. Гончаров, С.И. Полосков // Сварка и диагностика. 2013. № 4.

5. **Касаткин О.Г., Миходуй Л.И.** Выбор системы легирования шва при сварке высокопрочных сталей // Автоматическая сварка. 1992. № 5. С. 19–25.

6. **The effect** of vanadium and niobium on the properties and microstructure of the intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone in low-carbon micro-alloyed steels / Y. Li, D.N. Crowther, M.J.W. Green, P.S. Mitchell // The Iron and Steel Institute of Japan International. 2001. Vol. 41. № 1. P. 46–55.

7. **Высокопрочные** стали для магистральных трубопроводов / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова и др. // Вопросы материаловедения. 2009. № 3. С. 127–137.

8. **Modenesi P.J., Reis R.I.** A model for melting rate phenomena in GMA welding // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 189. Issues 1–3. P. 199–205.

9. **Ferro P., Bonollo F., Tiziani A.** Methodologies and experimental validations of welding process numerical simulation // International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering. 2010. Vol. 3. № 2–3. P. 114–132.

Михаил Александрович Шолохов, канд. техн. наук,
shmihael@yandex.ru;
Семен Николаевич Гончаров, канд. техн. наук;
Виктор Васильевич Бровко, канд. техн. наук;
Сергей Иосифович Полосков, д-р техн. наук

М.О. Мерабишвили *(ОАО "Тяжмехпресс", г. Воронеж)*

ОАО "Тяжмехпресс" – лидер по выпуску кузнечно-прессового оборудования

Завод по выпуску тяжелых механических прессов (ОАО "Тяжмехпресс", г. Воронеж) в 2013 г. отмечает 60-летний юбилей со дня выпуска первого пресса.

Основная продукция завода – кузнечно-прессовое оборудование и автоматизированные комплексы и линии на базе прессов для кузнечных и листоштамповочных производств и предприятий строительной индустрии.

Первую продукцию – однокривошипные прессы простого действия мод. К265 номинальной силой 2,5 МН (250 тс), завод выпустил в 1953 г. К настоящему времени ОАО "Тяжмехпресс" – крупнейшее предприятие в России, разрабатывающее, изготовляющее и поставляющее оборудование для кузнечных и листоштамповочных производств.

На втором году своей деятельности завод осуществляет первые экспортные поставки за рубеж – в Китай, а затем в Чехословакию, Польшу, Венгрию, Болгарию, Югославию, Румынию, Германию.

С 1962 г. прессы поставляются развивающимся странам Азии и Африки (Индия, Алжир, Египет, Пакистан, Шри-Ланка, Иран, Ирак и т.д.), а в 1967 г. завод выходит на международный рынок в такие страны, как: Италия, Франция, Англия, Япония, США и Швеция.

В 1971 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР "За большие успехи в выполнении заданий пятилетнего плана по выпуску тяжелого кузнечно-штамповочного оборудования, повышении производственной культуры и достижении высоких технико-экономических показателей в работе" завод награжден орденом Ленина.

В 1980 г. заводу, первому из предприятий отечественного прессостроения, за развитие производства, международной торговли и сотрудничество вручена Международная премия "Золотой Меркурий".

За создание и внедрение в промышленность высокоэффективных тяжелых и уникальных механических прессов широкой номенклатуры и на их основе автоматических линий и комплексов, в том числе на Камском автомобильном заводе, заводу присуждена Государственная премия СССР 1984 г. в области науки и техники (совместно с кафедрой Мосстанкина "Системы пластического деформирования").

В 1996 г. завод первым в машиностроительной отрасли получил международный сертификат на систему менеджмента качества МС ИСО 9001:2000, выданный фирмой ООО "Интерсертифика – ТЮФ" совместно с "ТЮФ" Тюринген" (Германия).

За работу "Научные основы проектирования и создание гаммы тяжелых кривошипных прессов, технологии штамповки и автоматических линий для изготовления крупных поковок" заводу присуждена Государственная премия Российской Федерации 2004 г. в области науки и техники (совместно с кафедрой "Технологии обработки металлов давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана).

По итогам конкурса, проводимого Минпромторгом России, ОАО "Тяжмехпресс" четыре года подряд становилось победителем в номинации "Лучший российский экспортер отрасли – машиностроение (промышленное оборудование)" за 2009–2012 гг.

Свыше 15 тыс. единиц оборудования успешно работает на предприятиях 54 стран мира в таких отраслях промышленности, как автомобильное, сельскохозяйственное и энергетическое машиностроение, железнодорожный транспорт, оборонно-промышленный комплекс.

Оборудованием марки "ТМП" располагают такие известные фирмы, как FIAT, RENAULT, PEUGEOT, TOYOTA, SAMSUNG, MITSUBISHI, KANEMATSU и др., а также производители автомобильных компонентов для мировых брендов автомобильных фирм Германии, Франции, Италии, Индии, Китая, Японии, Южной Кореи.

Оборудованием производства ОАО "Тяжмехпресс" полностью оснащена крупнейшая кузница в Европе FORGES DE COURSELLES (г. Ножан, Франция).

Рис. 1. Карта распространения экспортной продукции ОАО "Тяжмехпресс"

Из 17 кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) номинальной силой свыше 100 МН (10 000 тс), существующих в мире по состоянию на 2003 г., 8 прессов номинальной силой 125 МН (12 500 тс) имеют марку ТМП (2 из них работают на "АвтоГАЗе" (г. Нижний Новгород), остальные – в США, Мексике, Южной Корее, Китае, Индонезии, Индии).

ОАО "Тяжмехпресс" в последующий период разработало и поставило на внешний рынок 150 прессов различного назначения, в том числе КГШП номинальной силой 40 МН – 16 шт., силой 63 МН – 14 шт., силой 80 МН – 15 шт. и еще 2 пресса номинальной силой 140 МН.

Сейчас в производстве находится первый в мировой практике уникальный пресс номинальной силой 165 МН (16 500 тс), самый мощный из таких прессов, для китайских автомобильных компаний.

ОАО "Тяжмехпресс" участвует в программе по развитию и модернизации кузнечных и листоштамповочных производств промышленных предприятий Республики Беларусь ("МАЗ", "БелАЗ", "МТЗ", "КЗТШ") в плане поставок новейшего кузнечно-прессового оборудования.

ОАО "Тяжмехпресс" для обеспечения выпуска тяжелых КГШП создало высокооснащенную технологическую базу, состоящую из заготовительного, механообрабатывающего, сборочного и инструментального производств, с соответствующим уровню требований к каче-

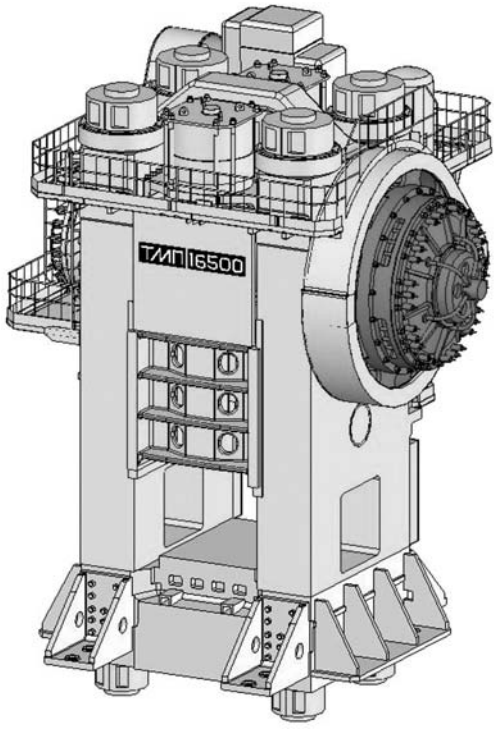


Рис. 2. КГШП номинальной силой 165 МН (16 500 тс)

ству изготовления деталей и прессов в целом метрологическим оборудованием.

Сварочное производство позволяет обеспечить выпуск базовых деталей прессов массой до 220 т (сварно-литое исполнение), длинномерных грузоподъемных, строительных и других металлоконструкций длиной до 35 м и массой до 60 т, изготовлять емкостное оборудование длиной до 20 м и диаметром до 5 м, а также сосуды, работающие под давлением.

На заготовительном участке проводится газовая резка листового стального проката толщиной 4...260 мм на станках с ЧПУ; резка на гильотинных ножницах металла толщиной от 1 до 25 мм и длиной до 3100 мм; резка на ленточно-пильном станке фирмы DOALL профильного проката; а также гибка, вальцовка, правка; на листогибочной машине "DAVI" мод. MSO3080 осуществляется вальцовка обечаек толщиной до 80 мм, диаметром до 8 м и шириной 0,6...3 м.

На сборочно-сварочном участке проводится сборка; полуавтоматическая сварка в углекислой среде; автоматическая сварка под слоем флюса; электрошлаковая сварка сварных соединений толщиной до 400 мм; отжиг сварных конструкций для снятия внутренних напряжений; вибростабилизация для длинномерных деталей массой до 25 т; дробеструйная очистка сварных конструкций.

Механообрабатывающее производство располагает уникальным станочным парком, позволяющим обеспечить обработку с высокой точностью многотонных деталей (до 250 т), имеющих значительные размеры.

Сборочное производство располагает тремя производственными пролетами: шириной до 30 м и высотой до подкрановых путей 21 м, мостовыми кранами грузоподъемностью до 320 т и стендовыми ямами глубиной 6 м.

Метрологический комплекс осуществляет контроль в три этапа: метрологическая проработка и метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации; метрологическое обслуживание средств измерения (СИ) и методов их применения, метрологическое обслуживание технологического процесса изготовления деталей, при этом использует различное оборудование.

Для действующей в ОАО "Тяжмехпресс" системы качества, подтвержденной международным сертификатом, необходимо применение современных методов и средств измерения, что определило два эффективных практических направления: приобретение и внедрение высокоточных СИ зарубежных фирм и использование в качестве СИ встроенных измерительных систем металлорежущих станков.

Внедрение только одной координатно-измерительной машины с программным управлением "Lambda" итальянской фирмы DEA с точностью измерения до 1 мкм и измерительным пространством 5240×3250×2520 мм позволило решить ряд проблем по измерению параметров крупногабаритных деталей.

Особое внимание в ОАО "Тяжмехпресс" уделяется достижению точности изготовляемого оборудования – контролю точностного состояния финишного оборудования и своевременной доводке его до паспортной точности. Использование цифровых отсчетных систем, которыми оснащено большинство современных металлорежущих станков, является основным средством обеспечения контролепригодности. Для выполнения такого контроля применяют измерительную систему фирмы Wyler и лазерную измерительную систему фирмы Karl Zeiss-Jena (Германия) с точностью измерения 0,1...0,4 мкм.

Комплексная система измерительных приставных приборов EVIM германской фирмы Höffler с точностью измерения до 1 мкм обеспечивает автоматическое измерение параметров кинематической точности прямозубых, косозубых и шевронных крупномодульных колес с модулем зуба 1...40 мм.

В арсенале метрологической службы ОАО "Тяжмехпресс" имеются и другие зарубежные СИ.

Контроль изготовления тяжелых механических прессов обеспечивает выполнение современных требований потребителей к качеству продукции.

Таким образом, основными задачами всех создателей машин – проектировщиков и изготовителей – являются повышение точности и конкурентоспособности выпускаемой продукции, обеспечение ее высокого качества, подтверждаемого международным сертификатом.

ОАО "Тяжмехпресс" – признанный лидер по производству тяжелых механических прессов. Из выпускаемого кузнечно-прессового оборудования 90 % предназначается для автомобильной отрасли.

Для оснащения кузнечных цехов, производств и заводов автомобильной отрасли ОАО "Тяжмехпресс" предлагает современные кривошипные горячештамповочные прессы номинальной силой 6,3...165 МН; прессы чеканочные силой 4...40 МН; прессы для холодного выдавливания силой 4...13 МН; пресс-автомат многопозиционный для полугорячей штамповки силой 16 МН; гидравлические и сортовые

ножницы номинальной силой от 1 до 16 МН; а также автоматизированные комплексы и автоматические линии на базе КГШП для производства поковок массой 0,5...200 кг.

КГШП последнего поколения существенно отличаются от предыдущих моделей конструктивным исполнением ползуна (ползун без хобота), имеют разгруженные от массы муфты опорные подшипники эксцентрикового вала, оснащены циркуляционной системой жидкой смазки всех подшипников, механизм регулировки штамповой высоты перенесен со стола в ползун и имеет точность установки по индикации на табло до 0,1 мм. Прессы оснащаются современными системами пневмоуправления и мониторинга.

Для оснащения листоштамповочных цехов и производства ОАО "Тяжмехпресс" предлагает:

- двух- и четырехкривошипные прессы двойного действия номинальной силой от 4/2,5 до 12,5/8 МН;
- одно-, двух- и четырехкривошипные закрытые прессы номинальной силой от 2 до 16 МН;
- четырехкривошипные прессы для испытания штампов и изготовления малых серий кузовных деталей номинальной силой от 10 до 20 МН;
- автоматические линии и комплексы для штамповки средне- и крупногабаритных кузовных деталей с грейферными перекладчиками, межпрессовыми роботами;
- автоматические линии для вырубки заготовок из рулонного материала.

Листоштамповочные прессы нового поколения снабжены рычажными или эксцентриковыми приводами с плунжерным направлением и регулируемой частотой ходов; гидравлическими предохранителями по силе; одним или двумя выдвижными столами с любой схемой выдвижения; пневматическими, гидропневматическими или гидравлическими подушками в столе с электромеханической регулировкой хода; микропроцессорной системой управления и контроля; централизованной системой жидкой смазки всех зубчатых передач, подшипников качения и скольжения, направляющих ползуна и подушки; пневматическими и гидравлическими системами с использованием аппаратуры и уплотнений ведущих зарубежных фирм.

Для стройиндустрии ОАО "Тяжмехпресс" изготовляет: автоматизированные линии по производству изделий из автоклавного ячеистого бетона в виде стеновых блоков, автоматизированные комплексы для производства силикатного кирпича на базе гидравлических прессов номинальной силой 4...8 МН, обеспечивающих изготовление соответственно 7 и 14 кирпичей за каждый ход пресса.

Для производства огнеупорного кирпича заводом разработан и изготовляется механический пресс двухстороннего прессования, обеспечивающий повышенное качество прессования из любой огнеупорной смеси.

Все прессы производства ОАО "Тяжмехпресс" сертифицированы и соответствуют всем требованиям безопасности российских стандартов и стандартов ISO.

Для проектирования прессов используются современные CAD/CAM/CAE технологии. Разработана программа тестирования машин не только на холостых ходах, но и под нагрузкой. На каждом этапе производства действует система контроля качества. Специалисты ОАО "Тяжмехпресс" могут спроектировать и изготовить прессы со специальными характеристиками по заказам потребителей.

Для вагоноколесных производств выпускают на базе гидравлических прессов автоматизированные комплексы для демонтажа и монтажа колесных пар вагонов.

Завод производит краны мостовые электрические специальные грузоподъемностью до 80 т и краны общего назначения грузоподъемностью до 250 т (ООО "ТрансТЮФ" (Москва) выдало предприятию необходимые сертификаты соответствия и получено разрешение территориального управления Ростехнадзора).

Маркетинговая политика предприятия, предусматривающая стратегию развития продаж на внешнем рынке в различных регионах сосредоточения автомобильных производств, и эффективная программа по ее практической реализации, позволили ОАО "Тяжмехпресс" уже на протяжении длительного периода эффективно присутствовать на мировом рынке кузнечно-прессового оборудования.

Мераби Отарович Мерабишвили,
генеральный директор ОАО "Тяжмехпресс"

УДК 621.979.134.004

В.И. Соков, А.Т. Крук*, Л.Т. Новокщенов *(ОАО "Тяжмехпресс", г. Воронеж, * Воронежский государственный технический университет)*

Кривошипный горячештамповочный пресс мод. К8052 номинальной силой 165 МН

Рассмотрен самый мощный в настоящее время кривошипный горячештамповочный пресс мод. К8052 номинальной силой 165 МН, изготовляемый в ОАО "Тяжмехпресс" (г. Воронеж), предназначенный для работы в составе автоматизированной линии для горячей штамповки поковок коленчатых валов и балок передней оси автомобиля в кузнечном производстве зарубежной фирмы.

Ключевые слова: кривошипный горячештамповочный пресс; сила пресса; жесткость пресса; надежность; система управления.

The most powerful currenly hot-stamping crank press (K8052 model) by nominal capacity of 165 MN manufactured by JSC "Tyazhmekhpress" (Voronezh) is considered, purposed to work in te automated production line for hot stamping of truck's crankshafts and front axle beams the forging foreign company.

Keywords: hot-stamping crank press; press force; press rigidity; reliability; control system.

ОАО "Тяжмехпресс" (г. Воронеж) – известный в промышленно развитых странах производитель и поставщик крупных механических прессов и автоматических линий на их базе – в текущем году будет выпущен самый мощный среди изготовленных до настоящего времени ведущими фирмами мира кривошипный горячештамповочный пресс (КГШП) номинальной силой 165 МН.

Предпосылкой для выполнения данной работы был заказ китайских и индийских фирм на приобретение КГШП номинальной силой 165 МН для производства коленчатых валов массой до 240 кг и балок передней оси до 2200 мм и более тяжелых деталей подобного типа.

В мировой технической практике было создано всего два сопоставимых КГШП номинальной силой 160 МН (16000 тс).

Первый из них – пресс мод. FPA-16000 (рис. 1), механический пресс простого действия с верхним приводом, с одноточечной подвеской ползуна и эксцентриковым приводом изготовлен японской фирмой Sumitomo Heavy Industries и в 1981 г. пущен в эксплуатацию на фирме Sumitomo Industries Machinery, в котором:

- эксцентриковый и приводной валы расположены параллельно фронту пресса;
- эксцентриковый вал сочленяется с ползуном посредством одного шатуна с передачей силы через гладкий палец, нижние опорные поверхности которого расширены за счет ступенчатой формы шатуна;
- маховик сочленен с приводным валом через фрикционное предохранительное устройство;
- ползун снабжен удлинителем (хоботом), несущим дополнительные направляющие поверхности;
- муфта включения (двухдисковая фрикционная, пневматическая), встроенная в колесо зубчатой передачи, и ленточный тормоз (с пневматическим отключением) размещены на консолях эксцентрикового вала, который не разгружен от массы зубчатого колеса и ведущих элементов муфты; муфта расположена на левой стороне пресса;
- станина разъемная, состоящая из стола, двух стоек, несущих основные направляющие ползуна, и траверсы, в которой размещены опоры эксцентрикового вала и направляющие для удлинителя ползуна; элементы станины, выполненные из стального литья, образуют замкнутую силовую раму, стянутую воедино четырьмя стяжными шпильками.

Основное положительное отличие от известных конструкций состоит в том, что двухклиновой механизм регулирования штамповой высоты перенесен из стола пресса в ползун и снабжен приводом от гидравлического мотора.

Несмотря на то что при создании пресса 160 МН были задействованы самые эффективные по тем временам методы проектирования (экспериментальные исследования КГШП 110 МН, расчеты и оптимизация основных силовых деталей с использованием метода конечных элементов и экспериментальная проверка принятых решений на действующей модели пресса, выполненной в масштабе 1:10), конструкция КГШП 160 МН получилась громоздкой и излишне тяжелой: по сравнению с КГШП той же номинальной силы фирмы Hasenclever (Германия) (рис. 2) он выше примерно на 3 м и тяжелее почти на 800 т (табл. 1).

Основной причиной этого следует считать неоправданное увеличение хода ползуна на 200 мм, повлекшее за собой увеличение штамповой высоты (зависящей от хода ползуна) и крутящего момента на эксцентриковом валу.

Второй пресс – КГШП номинальной силой 160 МН мод. VEPES-16000 (см. рис. 2), кривошипный горячештамповочный пресс с эксцентриковым приводом, изготовленный немецкой фирмой Hasenclever

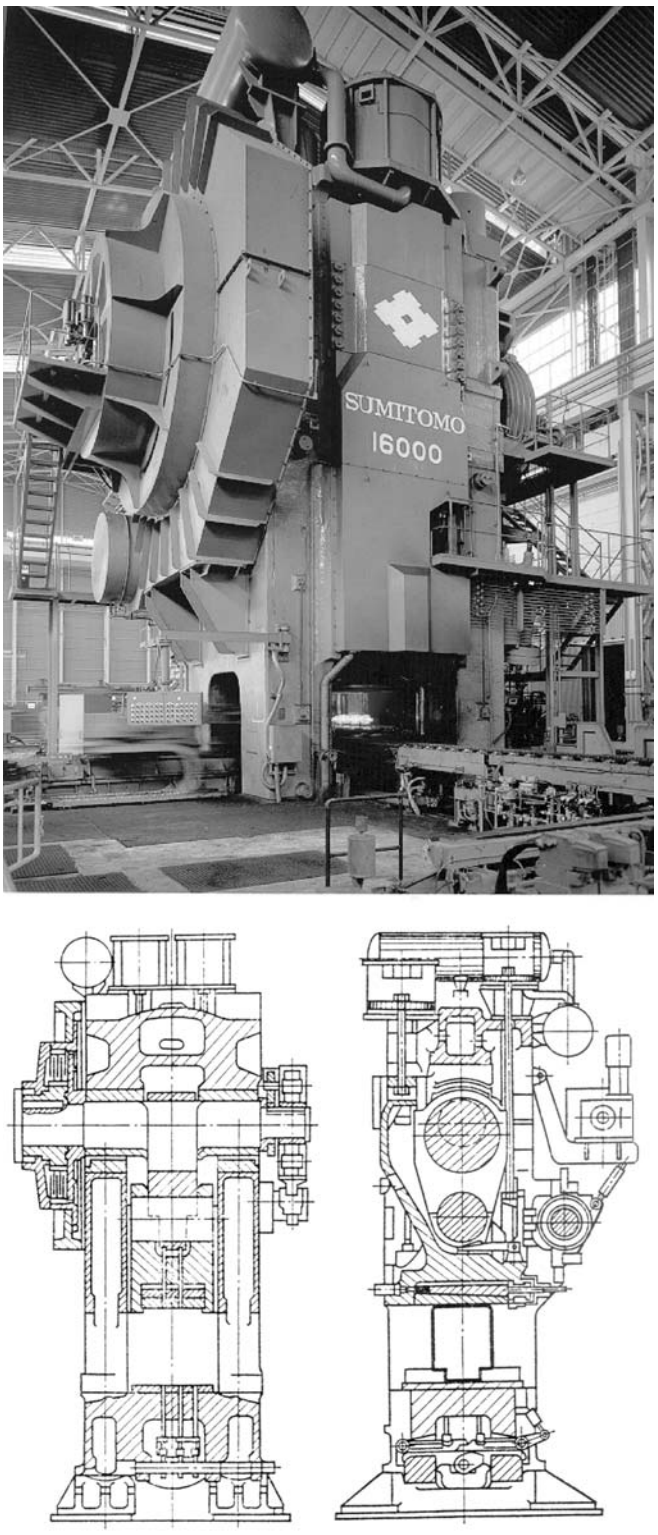
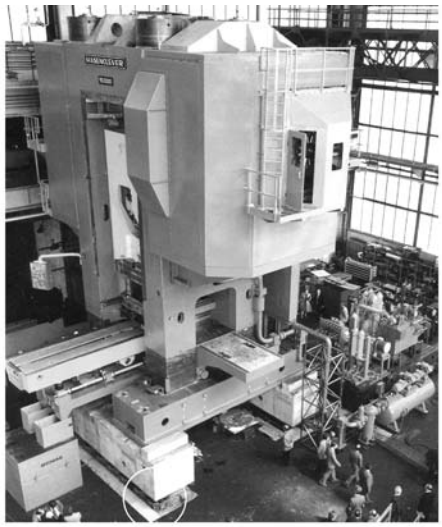


Рис. 1. КГШП номинальной силой 160 МН фирмы Sumitomo (Япония)

по заказу шведской фирмы AB Bofors Kilsta в 1981 г., так же, как и пресс фирмы Sumitomo, является главным агрегатом автоматической горячештамповочной линии по производству аналогичных поковок коленчатых валов массой до 250 кг и балок длиной около 2 м передней оси грузовых автомобилей.



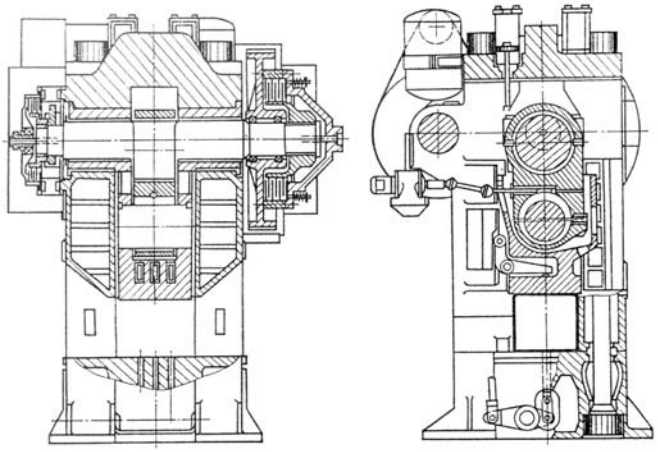


Рис. 2. КГШП номинальной силой 160 МН фирмы Hasenclever (Германия)

Конструктивная схема этого пресса (см. рис. 2) идентична проверенным в условиях длительной эксплуатации КГШП ряда VEPES номинальной силой от 20 до 80 МН, которые фирма Hasenclever производила в течение ряда лет, придерживаясь классической конструктивной схемы.

Конструктивное исполнение основных узлов и механизмов пресса КГШП 160 МН фирмы Hasenclever имеет в сравнении с КГШП 160 МН фирмы Sumitomo ряд существенных отличий, в частности:

• ползун пресса выполнен в виде рамы без хобота – удлинителя, который, как показала практика эксплуатации КГШП этой фирмы и проведенные авторами статьи исследования, не дает значительного повышения точностных характеристик пресса, особенно при развитых по высоте основных направляющих ползуна; направляющие поверхности размещены в наклонных плоскостях, проходящих через вертикальную ось (центр) ползуна, что делает их нечувствительными к разогреву ползуна в процессе

1. Технические характеристики сопоставимых сверхтяжелых КГШП

Параметр	Производитель сверхтяжелых КГШП		
	Sumitomo (Япония)	Hasenclever (Германия)	ОАО "Тяжмехпресс" (Россия)
Номинальная сила пресса $P_н$, МН	160	160	165
Ход ползуна S, мм	700	520	600
Частота непрерывных/одиночных ходов ползуна n, мин$^{-1}$	25/6	34	32
Закрытая высота, мм	2350	2350	2100
Величина регулировки закрытой высоты, мм	20	34	20
Размеры стола, мм:			
слева направо	2400	2260	2500
спереди назад	3550	2600	3500
Размеры ползуна, мм:			
слева направо	2100	2120	2250
спереди назад	3508	2600	3000
Верхний выталкиватель:			
число позиций	–	–	2
ход, мм	–	–	50
сила, МН	0,6	0,6	0,5
Нижний выталкиватель:			
число позиций	–	–	2
ход, мм	–	–	60 и 170
сила, МН	0,8	0,8	0,7
Главный привод:			
мощность, кВт	800	700	800
частота вращения, мин$^{-1}$	750	750	750
Масса пресса G, т	2400	1625	2100
Общая высота над уровнем пола H, мм	13 550	10 500	12 700

работы пресса и позволяет примерно втрое уменьшить зазоры между направляющими поверхностями ползуна и станины;

• регулирование штамповой высоты осуществляется разворотом нижнего подшипника шатуна, выполненного в виде эксцентриковой втулки, сцепленной с червяком, привод которого установлен на станине;

• в сборной станине, состоящей из литых стола, двух стоек и траверсы, стянутых в жесткую раму, посадочные гнезда для эксцентрикового и приводного валов, а также поверхности для установки направляющих выполнены в одних и тех же элементах – стойках, что упрощает технологическое обеспечение точности взаимного расположения осей валов и направляющих ползуна;

• поршень фрикционной муфты и нажимной диск тормоза соединены в осевом направлении штангой, размещенной в центральном сквозном отверстии эксцентрикового вала, что обеспечивает идеальную механическую блокировку взаимной работы муфт и тормоза; торможение осуществляется пружинами, возвращающими поршень муфты в исходное положение, а растормаживание – подачей воздуха в цилиндр муфты (однако такая система не безупречна с точки зрения современных требований техники безопасности, так как в случае разрушения радиально-упорного подшипника качения, связывающего постоянно вращаю-

щуюся штангу с не вращающимся нажимным диском тормоза, тормоз становится не работоспособным).

Конструкция КГШП 160 МН фирмы Hasenclever отвечает технологическому назначению машины, в соответствии с которым она эксплуатируется в кузнице шведской фирмы AB Bofors Kilsta.

Горячештамповочный кривошипный пресс мод. К8052 номинальной силой 165 МН (рис. 3) производства ОАО "Тяжмехпресс" имеет существенные преимущественные отличия по сравнению с рассмотренными прессами фирм Sumitomo и Hasenclever.

КГШП мод. К8052 номинальной силой 165 МН предназначен для горячей штамповки коленчатых валов массой до 240 кг и балок передней оси длиной до 2200 мм и других деталей, например, типа нефтегазопроводных фланцев, что потребовало увеличения хода ползуна пресса по сравнению с КГШП 160 МН фирмы Hasenclever, но обеспечило его бóльшую универсальность.

Пресс выполняется в соответствии с концепцией, ставшей традиционной для ОАО "Тяжмехпресс" для этого класса машин, для которой характерны следующие отличительные особенности в сравнении с другими производителями КГШП (см. рис. 3, табл. 1 и 2):

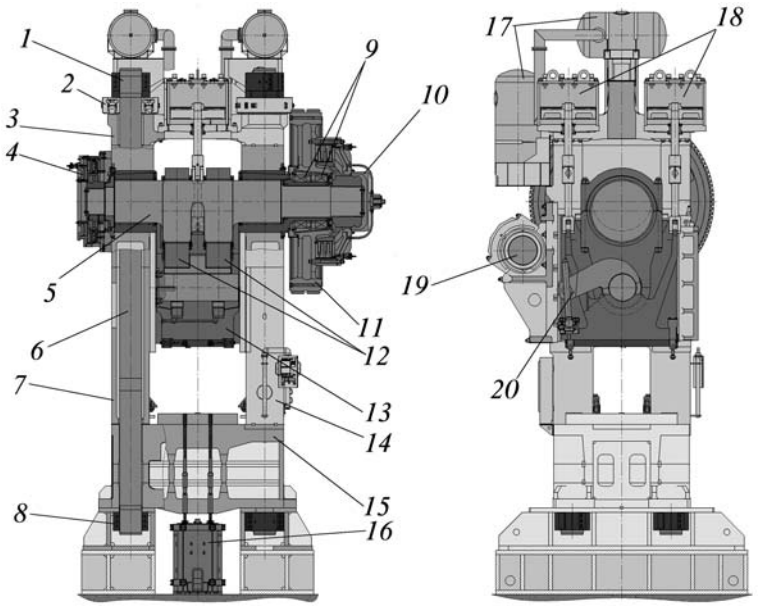


Рис. 3. Конструктивная схема КГШП номинальной силой 165 МН ОАО "Тяжмехпресс":

1 – верхняя гайка; *2* – устройство для вывода пресса из распора; *3* – траверса; *4* – тормоз; *5* – вал эксцентриковый; *6* – шпилька стяжная; *7* – стойка левая; *8* – гайка нижняя; *9* – подшипники муфты; *10* – муфта; *11* – зубчатое колесо муфты; *12* – шатуны; *13* – ползун; *14* – стойка правая; *15* – стол; *16* – выталкиватель нижний; *17* – ресиверы для сжатого воздуха; *18* – уравновешиватели; *19* – вал приводной; *20* – механизм регулировки закрытой высоты пресса

• двухкривошипный эксцентриковый вал, размещенный в стойках станины, расположен параллельно фронту пресса и связан с ползуном двумя шатунами;

• вся кривошипно-шатунная группа, подшипники промежуточного вала, зубчатое зацепление, направляющие ползуна смазываются от однолинейной системы жидкой циркуляционной смазки, что позволило значительно снизить потери на трение и практически исключить вероятность заклинивания пресса;

• нижние головки шатунов, размещенные в ползуне, соединены с ним трехопорной осью и промежуточными эксцентриковыми втулками.

Изменение закрытой высоты пресса достигается поворотом эксцентриковых втулок относительно оси. Таким образом, механизм изменения закрытой высоты расположен в ползуне. Специальная система отсчета позволяет выполнить регулировку закрытой высоты с точностью 0,1 мм и транслировать ее фактическую величину на главный пульт управления прессом;

• станина пресса стягивается гидрогайками, обеспечивающими тарированную затяжку пресса и при необходимости быстрый и легкий вывод пресса из распора;

• для повышения долговечности эксцентрикового вала, его бронзовых подшипников скольжения и обеспечения стабильного зазора в зубчатом зацеплении эксцентриковый вал разгружен от массы зубчатого колеса и муфты, которые размещаются на специальной втулке корпуса подшипника правой опоры эксцентрикового вала, закрепленного на станине соосно с эксцентриковым валом;

• на случай аварийного обрыва штока уравновешивателя в его крышке устанавливаются специальные демпферы (гасители ударных нагрузок), обеспечивающие не только безопасность, но и сохранность других деталей уравновешивателя;

• трехдисковая муфта обеспечена двухступенчатым безударным включением за счет использования специально разработанного совместно со специалистами фирмы Ross EUROPA (Германия) пневмораспределителя с проходными сечениями $2\frac{1}{2}$ " и $3\frac{1}{2}$ ";

• тормоз двухдисковый, управляемый отдельно от муфты также пневмораспределителем фирмы Ross EUROPA;

• все соединения ступиц с валами муфты, тормоза, шестерни и маховика выполнены без шпонок с помощью горячего обжатия конических промежуточных гильз (при необходимости съем ступиц осуществляется гидравлическим способом – путем подачи давления масла в специальные канавки, выполненные в промежуточной гильзе на поверхности, контактируемой с валом);

2. Кинематические и кинетостатические параметры сопоставимых сверхтяжелых КГШП

Параметр	Производитель сверхтяжелых КГШП		
	Sumitomo (Япония)	Hasenclever (Германия)	ОАО "Тяжмехпресс" (Россия)
Номинальная сила пресса $P_н$, МН	160	160	165
Ход ползуна S, мм	700	520	600
Радиус кривошипа R, мм	350	260	300
Диаметр эксцентрика D_a, мм	2100	1700	1930
Диаметр подшипника опоры $D_о$, мм	1400	1400	1320
Диаметр подшипника в ползуне D_b, мм	1310	1400	1180
Длина шатуна L, мм	2810	2600	2400
$\lambda = R / L$	0,125	0,100	0,125
Диаметр, мм:			
шкива $d_{шк}$	646	874	702
маховика $D_м$	3525	3200	3341,5
Передаточное число клиноременной передачи $i_{кл}$	5,456	3,660	4,760
Диаметр, мм:			
шестерни $d_ш$	1380	1150	1207,52
колеса $D_к$	7600	5990	5711,57
Передаточное число зубчатой передачи $i_{зуб}$	5,50	5,20	4,73
Передаточное число общее $i_{общ}$	30	19,032	22,510
Синхронная скорость, мин$^{-1}$	750	750	750

• обеспечен активный постоянный контроль температуры основных подшипников скольжения и качения;

• установлен указатель силы штамповки с контролем величины перегрузки.

Большинство принятых для реализации в конструктивной схеме КГШП 165 МН ОАО "Тяжмехпресс" технических решений защищено авторскими свидетельствами и патентами, основные из которых приведены в работе [1].

Производственно-техническая приемлемость перечисленных решений применительно к сверхтяжелым КГШП была апробирована при создании первого в мировой практике прессостроения КГШП номинальной силой 140 МН. Два таких пресса изготовлены ОАО "Тяжмехпресс" в 2010 и 2011 гг. и эксплуатируются на предприятиях в Китае.

Увеличенные параметры деталей КГШП 165 МН, общая масса которого 2100 т, вызывали затруднения при его изготовлении.

Например, эксцентриковый вал имеет массу 100 т, он изготовлен из поковки хромоникелевой стали и имеет длину 8,6 м, диаметр опорных шеек подшипников 1400 мм, диаметр по эксцентриковой (мотылевой) шейке 1900 мм.

Каждая из четырех стягивающих станину пресса шпилек имеет длину 14,56 м, диаметр по телу 700 мм и массу 43,9 т, изготовлена из поковки хромоникелевой стали.

Стол пресса изготовлен из стальных литых легированных марганцем элементов, сваренных электрошлаковой сваркой и весит 240 т.

Маховик по наружному диаметру 3365 мм, шириной 900 мм и весит 35 т (полезная энергия маховика при падении числа оборотов до 15 % составляет 3875 кДж).

Зубчатое колесо, которое соединяется с эксцентриковым валом через фрикционную муфту, имеет наружный диаметр 5800 мм, шевронный зуб (модуль 40) и массу 90 т (отливка из хромомолибденовой стали).

При проектировании пресса предстояло решить сложную задачу по выбору диаметра колеса, его габаритные размеры создавали одновременно трудности

технологического изготовления и необходимость решения вопроса по способу транспортирования по железной дороге при отгрузке пресса заказчику, для преодоления которых в целях минимизации диаметра колеса дополнительно проводили и сравнение кинетостатических параметров уже находящихся в эксплуатации прессов фирм Sumitomo и Hasenclever (см. табл. 2).

КГШП мод. К8052 ОАО "Тяжмехпресс" предназначен для использования в качестве главного технологического агрегата автоматической линии, состоящей из пяти различных машин, оснащенных роботами.

Для обеспечения безусловной конкурентоспособности создаваемого КГШП 165 МН были также проведены анализ и сравнение кинетостатических параметров прессов, исходя из равенства их основного параметра $P_н$ – номинальной силы, а именно: 160 МН, т.е. в предположении, что и пресс производства ОАО "Тяжмехпресс" имеет номинальную силу 160 МН.

В данном случае выходным параметром для сравнения стал недоход до *крайнего нижнего положения* (КНП) ползуна, нагружаемого номинальной силой, развиваемой прессом, величина которого регламентируется производителями прессов (10° угла поворота кривошипа у фирмы Hasenclever и 10 мм пути ползуна до КНП у фирмы Sumitomo).

С этой целью рассмотрены совмещенные графики (рис. 4) зависимости перемещений и моментов в функции от угла недохода ползуна соответственно для каждого из сравниваемых прессов.

Путь ползуна S в зависимости от угла α поворота кривошипа (угол α отсчитывается от КНП против направления вращения) определяли по следующей приближенной формуле [2]:

$$S = R(1 - \cos\alpha + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\alpha)). \qquad (1)$$

Момент, допускаемый приводом при приложении номинальной силы:

$$M_{кр} = P_н \; m_k \; , \qquad (2)$$

где m_k – приведенное плечо крутящего момента кривошипно-шатунного механизма,

$$m_k = R(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha) + \\ + 0{,}5\mu\,[(1+\lambda)\,D_a + \lambda D_b + D_o\,],$$

где μ – приведенный коэффициент трения шатунно-кривошипной группы.

Графики, построенные по формулам (1) и (2) (см. рис. 4), позволяют сравнить силовые возможности выбранных кинематических параметров КГШП фирм Sumitomo, Hasenclever и ОАО "Тяжмехпресс".

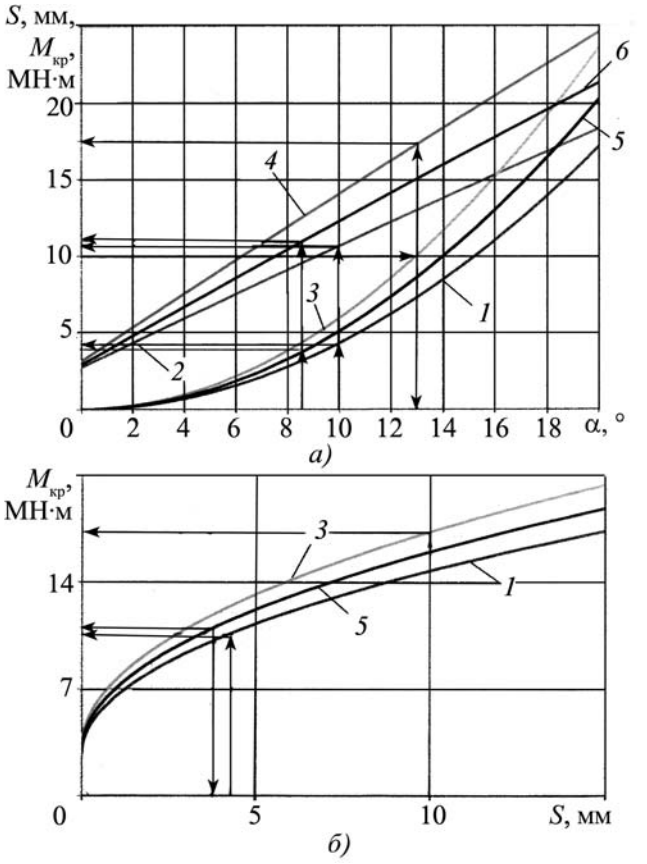


Рис. 4. Графики перемещений и моментов по углу поворота кривошипа (*а*) и моментов по пути ползуна (*б*) в приведении к номинальной силе 160 МН для КГШП различных фирм-производителей:

1, *2* – Hasenclever; *3*, *4* – Sumitomo; *5*, *6* – ОАО "Тяжмехпресс"

Фирма Sumitomo, заявляя 10 мм недохода по пути ползуна на КГШП 160 МН, получает при этом на кривошипном валу крутящий момент $M_{кр} \approx$ ≈ 16,5 МН·м (при недоходе по углу $\alpha \approx 12{,}6°$).

Как уже было отмечено, такое увеличение хода ползуна, штамповой высоты и крутящего момента на эксцентриковом валу следует считать неоправданным для указанных выше поковок.

КГШП фирм Hasenclever и ОАО "Тяжмехпресс" в приведении к номинальной силе 160 МН при недоходе по пути ползуна соответственно 4,5 и 3,7 мм, по углу поворота кривошипа $\alpha \approx 10$ и 8,3° и крутящем моменте 10,5 и 11 МН·м являются равноценными по силовым и кинематическим параметрам.

Расчетное значение крутящего момента $M_{кр}$ на кривошипном валу определяется графиком технологического нагружения, реальным графиком сил штамповки, или расчетным, получаемым методом конечных элементов с помощью программы Q-Form 3D.

В данном случае расчетный крутящий момент, необходимый для штамповки коленчатых валов с мас-

сой заготовки до 240 кг и балок передней оси длиной до 2400 мм, был принят равным 11 МН·м. Это значение вписывается в типовой график технологического нагружения пресса [2].

Диаметр зубчатого колеса (для КГШП ОАО "Тяжмехпресс" $D_к$ = 5800 мм), выбранный исходя из транспортных возможностей, меньше, чем у КГШП фирмы Hasenclever ($D_к$ = 5990 мм) и у фирмы Sumitomo ($D_к$ = 7600 мм).

Отметим, что сравнительный кинетостатический анализ проведен при одинаковом приведенном коэффициенте трения главного исполнительного механизма $\mu = 0{,}01$.

При использовании жидкой смазки на КГШП ОАО "Тяжмехпресс" коэффициент трения μ в период выполнения технологической операции достигает 0,002 [3]. Густая смазка, применяемая на КГШП фирм Sumitomo и Hasenclever, позволяет получить коэффициент трения в период выполнения технологической операции $\mu = 0{,}08...0{,}015$.

Еще одним значимым, конкурентоопределяющим показателем является предельное значение полезной энергии маховика, отдаваемой при выполнении технологической операции. Например, для КГШП фирмы Hasenclever она составляет 3500 кДж при падении числа оборотов маховика на 15 %, такие же показатели и у КГШП ОАО "Тяжмехпресс", что достаточно для производства заявленных деталей.

Заключение. ОАО "Тяжмехпресс" обеспечивает создание самого мощного в настоящее время конкурентоспособного КГШП номинальной силой 165 МН. Пресс относится к третьему поколению выпускаемых горячештамповочных прессов и является уникальным представителем кузнечно-штамповочного оборудования не только по номинальной силе, но и по габаритным размерам, массе штампуемых поковок и основным техническим характеристикам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гехтман Д.А., Зарудный В.В., Крук А.Т.** Создание инновационных технологий и оборудования обработки металлов давлением: кривошипный горячештамповочный пресс силой 140 МН // КШП. ОМД. 2010. № 12. С. 28–35.

2. **Ланской Е.Н., Банкетов А.Н.** Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов: М.: Машиностроение, 1966. 360 с.

3. **Сравнительный** анализ эксплуатационных показателей тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов фирмы Eumuco и ЗАО "Тяжмехпресс" / Д.Д. Мирианашвили, В.В. Аверин, С.Н. Климов, В.И. Соков // КШП. ОМД. 2006. № 11. С. 18–30.

Владимир Ильич Соков, канд. техн. наук;
Александр Тимофеевич Крук, д-р техн. наук,
kruk938@mail.ru;
Леонид Тихонович Новокщенов

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

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

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

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

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

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

УДК 621.771.06:669.1

С.В. Поворов *(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

Исследование эффекта переформовки, возникающего при профилировании листового металла в роликах

На примере роликовой формовки деталей типа швеллера рассмотрена особенность процесса подгибки элемента профиля при прохождении заготовки через формующие ролики, состоящая в том, что при подгибке элемента профиля, у которого срединная линия поперечного сечения не является прямой линией, после прохождения формующих роликов угол подгибки продолжает увеличиваться. Приведены возможные причины этого явления.

Ключевые слова: роликовая формовка; швеллер; математическое моделирование; угол подгибки; переформовка.

On the example of roller forming of details of type of channel is considered feature of the binders process of profile element by passging of the workpiece through forming rollers. This feature is that when binders of profile element, in which the median line of the cross section is not straight line, after the passage of forming rollers angle of binders continues to increase. The possible reasons for this phenomenon are given.

Keywords: roller forming; channel; mathematical modeling; angle of binders; remolding.

Рассмотрен процесс роликовой формовки четырех швеллеров с размером стенки 80 мм и размерами полки $b_п$: 40; 60; 80 и 100 мм (рис. 1, *а*). Толщина листовой заготовки s_0 = 4 мм. Также рассмотрен процесс формовки деталей типа швеллера, у которых полки имеют дополнительные элементы (см. рис. 1, *б*). Размеры стенки и полок деталей такого типа соответствуют размерам указанного ранее швеллера. Дополнительные элементы: скругление с внутренним радиусом 4 мм и плоский элемент шириной 16 мм для всех деталей одинаковы.

Формовку деталей из листовой заготовки осуществляли в последовательно расположенных парах формующих роликов. В статье приведены данные о калибровке и формообразовании заготовки в первых четырех клетях, этого достаточно для исследования причин эффекта переформовки. Формы поперечного сечения заготовки осевыми плоскостями формующих роликов соответствуют калибровкам этих роликов и показаны на рис. 2.

Валки 1-й клети являются задающими и в них формовка не осуществляется. В последующих калибрах

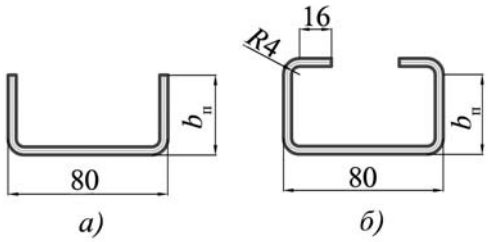


Рис. 1. Типы исследуемых профилей

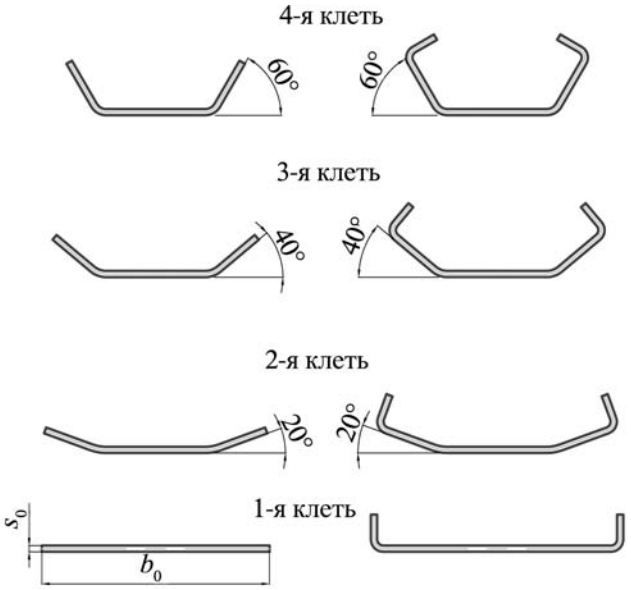


Рис. 2. Поперечные сечения заготовок осевыми плоскостями роликов

происходит подгибка полок на угол 20, 40 и 60°. Расстояние между клетями 800 мм.

Для исследования процесса в программе Ls-Dyna была разработана математическая модель [1], в которой учитываются упруго-пластичное поведение материала листовой заготовки, а также контактное взаимодействие заготовки и формующих роликов.

Упругопластичные свойства конструкционной стали, из которой изготовлена заготовка, аппроксимируются билинейной кривой, для которой задан модуль упругости первого рода – 200 ГПа, предел текучести материала – 210 МПа, модуль упрочнения в пластичной зоне – 600 МПа и коэффициент Пуассона – 0,3. Поскольку деформации формующих роликов в процессе формовки пренебрежимо малы по сравнению с деформацией заготовки, они считаются абсолютно жесткими телами.

В результате решения математической модели было получено деформированное состояние заготовки в процессе формовки. По этим данным построены графики изменения угла подгибки полок в процессе формовки в калибрах и межклетьевых промежутках.

В работе [2] приведены те же графики, но полученные экспериментальным путем для швеллера, показанного на рис. 1, *а*. На рис. 3 показаны графики изменения угла подгибки в 3-й и 4-й клетях профилегибочного стана при подгибке полок швеллера (см. рис. 1, *а*) на угол 40 и 60° соответственно. Вертикальная ось на графиках совпадает с осевой плоскостью валков. По горизонтальной оси рассмотрен интервал от 400 мм перед осевой плоскостью (слева от оси ординат) до 400 мм за осевой плоскостью (справа от оси ординат).

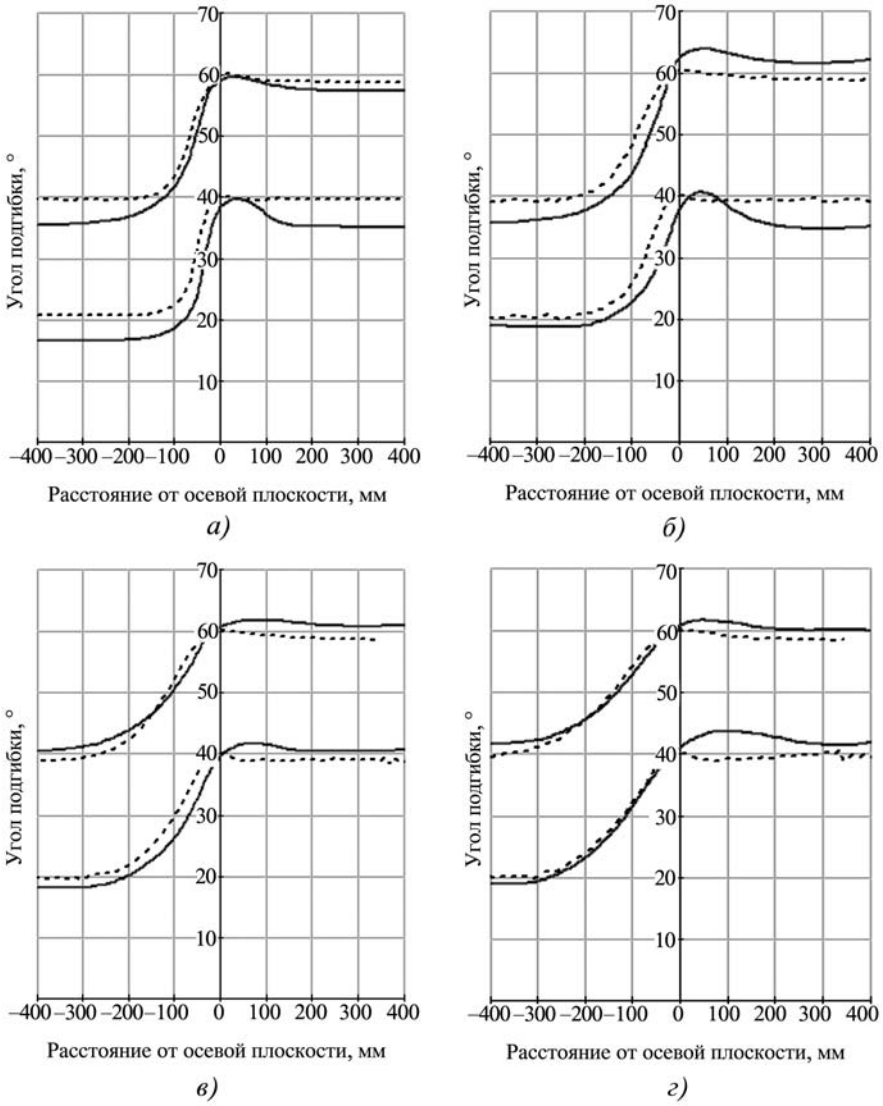


Рис. 3. Углы подгибки, полученные экспериментально (—) [1] и математическим моделированием в программе Ls-Dyna (- - -), для швеллеров различных размеров:

а – 80×40×4 мм; *б* – 80×60×4 мм; *в* – 80×80×4 мм; *г* – 80×100×4 мм

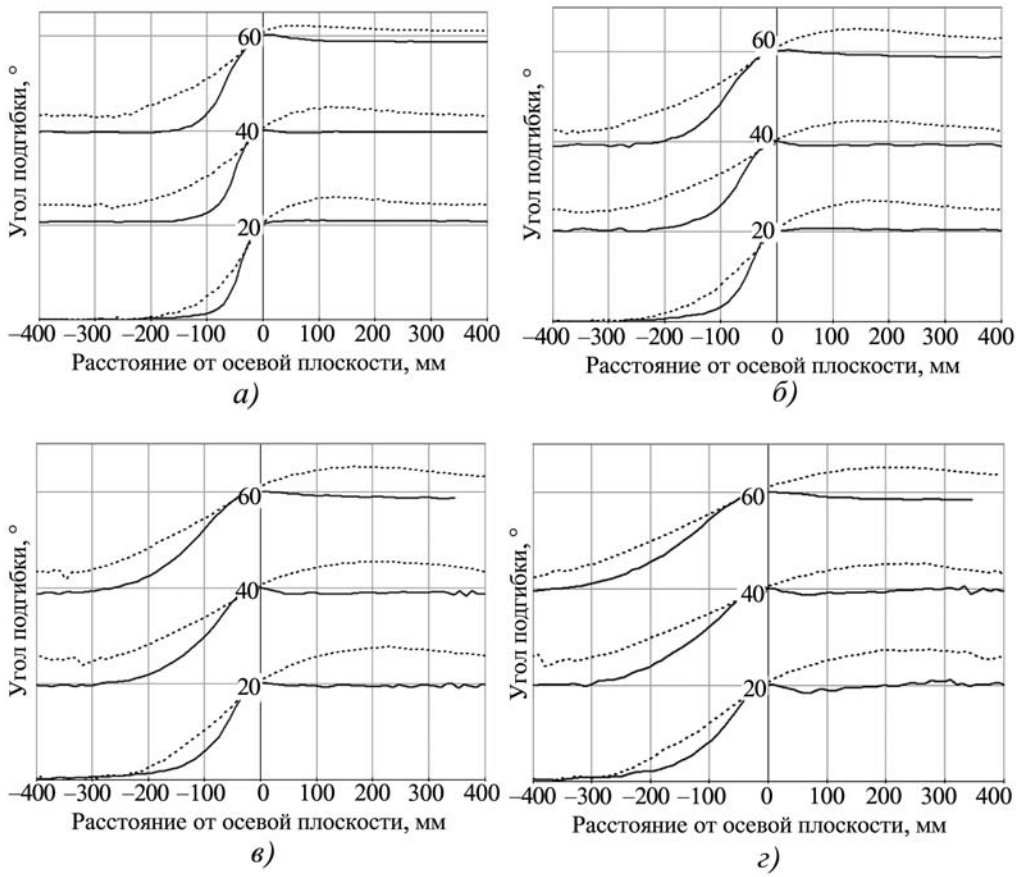


Рис. 4. Углы подгибки для швеллеров с плоскими полками (—) и швеллеров, полки которых имеют отогнутые края (- - -): *а* – 80×40×4 мм; *б* – 80×60×4 мм; *в* – 80×80×4 мм; *г* – 80×100×4 мм

Из рис. 3 видно, что данные, полученные путем математического моделирования, отклоняются от экспериментальных данных не более чем на 12 %, что является достаточным для практических расчетов.

Данные об изменении угла подгибки в процессе формовки для детали, показанной на рис. 1, *б*, в литературе не представлены. Для заготовок этого типа указанные графики были построены по результатам математического моделирования.

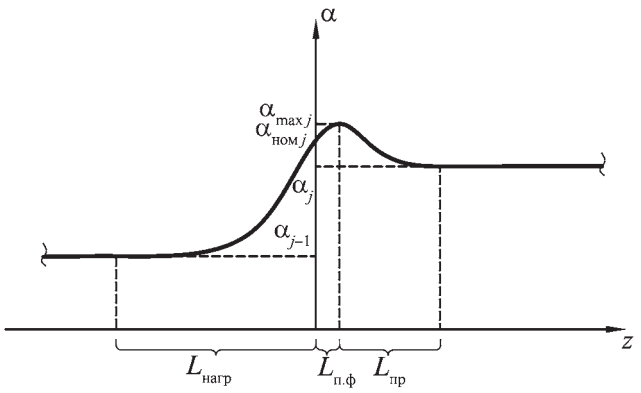


Рис. 5. Схематичное изображение графика изменения угла подгибки

Приведенные на рис. 4 кривые имеют ряд характерных особенностей, которые удобно рассмотреть на обобщенном графике (рис. 5).

Во всех графиках (см. рис. 4) можно выделить зону нагружения $L_{нагр}$ – это зона перед осевой плоскостью, в которой происходит плавное увеличение угла подгибки от значения α_{j-1}, полученного в предыдущем переходе, до значения $\alpha_{ном\,j}$, определяемого углом калибра текущего перехода.

За осевой плоскостью находится зона переформовки $L_{пф}$, в которой заготовка, выходящая из валков, продолжает подгибаться до некоторого значения $\alpha_{max\,j}$, превышающего значение угла в калибре $\alpha_{ном\,j}$. Для заготовок с плоскими полками, не имеющими дополнительных элементов, эта зона практически отсутствует.

Далее следует зона упругой разгрузки мест сгиба. Угол подгибки в результате упругой разгрузки становится несколько меньше максимального значения, достигнутого в текущем переходе. Таким образом, угол подгибки в текущем переходе достигает значения α_j. Совокупность трех перечисленных зон в литерату-

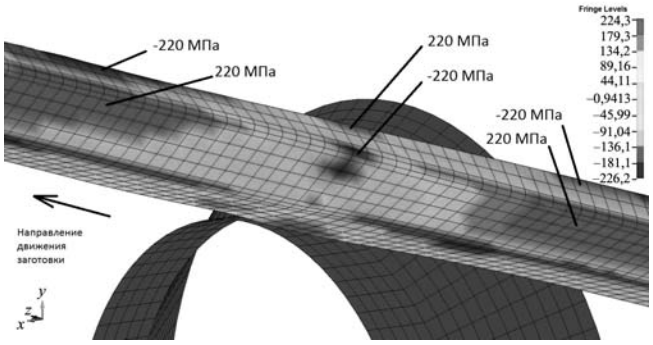


Рис. 6. Поле продольных напряжений

ре называют зоной плавного перехода или зоной внеконтактной деформации. Также из графиков видно, что в исследуемых случаях протяженность зон плавного перехода меньше межклетевого расстояния. Это означает, что соседние клети практически не влияют на изменение угла подгибки в текущей клети.

Чтобы понять причины возникновения эффекта переформовки, рассмотрим поле продольных напряжений σ_z (рис. 6), возникающих в заготовке, подгибаемая полка которой имеет дополнительный отогнутый элемент.

Из рис. 6 видно, что подгибаемая полка по своей длине воспринимает знакопеременную деформацию. Дополнительный элемент подгибаемой полки в зоне нагружения и в зоне разгрузки находится в продольно сжатом состоянии, а в зоне переформовки – в продольно растянутом. При этом значения напряжений по абсолютной величине практически одинаковы. Распределение продольных напряжений для деталей других размеров имеет такие же характерные особенности.

На рис. 7 показана эпюра продольных напряжений σ_z, построенная на срединной линии поперечного сечения заготовки осевой плоскостью валков. Свободный край дополнительного элемента полки находится в растянутом состоянии, а часть этого же элемента со стороны подгибаемой полки – в сжатом состоянии. При этом напряжения изменяются практически по линейному закону. Подобным линейным образом продольные напряжения распределяются при продольном изгибе балок.

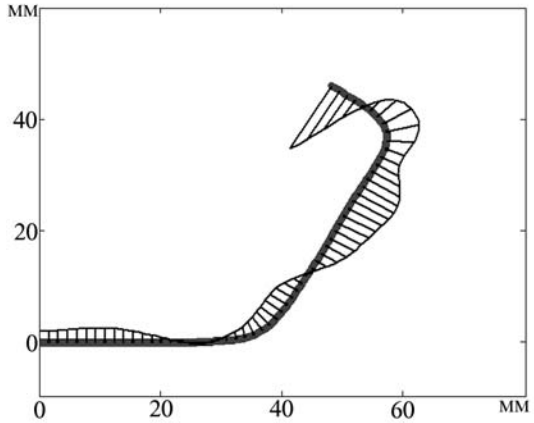


Рис. 7. Эпюра продольных напряжений в сечении заготовки осевой плоскостью валков

Таким образом, продольные напряжения, возникающие в дополнительном элементе профиля в зоне осевой плоскости валков, по своему действию эквивалентны изгибающему моменту, лежащему в плоскости дополнительного элемента (рис. 8).

Под действием этого момента происходит увеличение угла подгибки после выхода заготовки из формующих валков. На рис. 9 представлен в изометрическом виде тот же фрагмент заготовки, что и на рис. 8; эквивалентный изгибающий момент приложен со стороны осевой плоскости валков и лежит в плоскости дополнительного элемента профиля. Штриховой линией на рис. 9 показан контур заготовки, который она примет при отсутствии момента.

В случае, если подгибаемая полка не имеет дополнительных элементов, момент, вызывающий эффект переформовки, может возникнуть только за счет изменения продольных напряжений по толщине подгибаемой полки, но равнодействующие силы от этих напряжений будут иметь очень малое плечо (в пределах толщины заготовки), и, следовательно, не смогут развить достаточно большого изгибающего момента.

Логично предположить, что изгибающий момент, являющийся причиной переформовки, зависит не только от продольных напряжений, возникающих в дополнительном элементе профиля, но и от размеров и формы этого элемента.

В данном исследовании размеры и форма дополнительного элемента одинаковы во всех случаях. Тем не менее, из рис. 4 видно, что значение угла переформовки различно для разной ширины подгибаемой полки, это значит, что ширина подгибаемой полки также

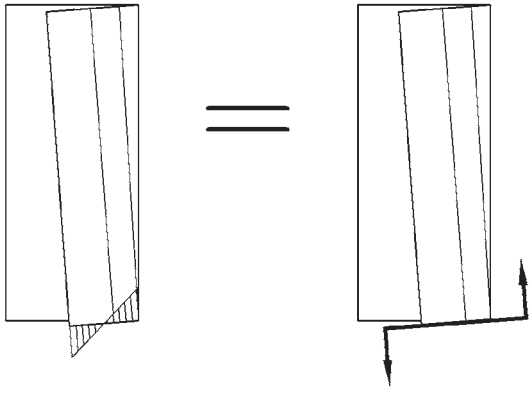


Рис. 8. Вид сверху на фрагмент заготовки, находящейся в зоне переформовки

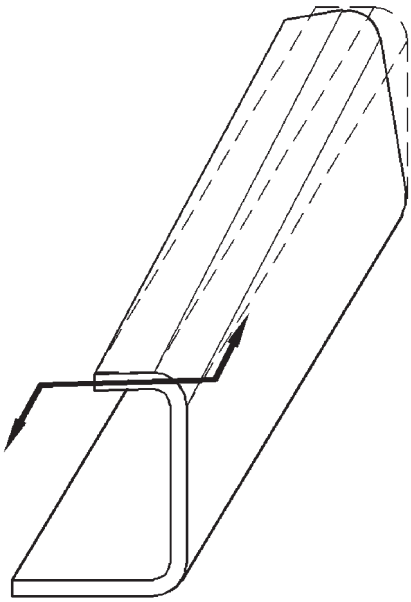


Рис. 9. Фрагмент заготовки, находящейся в зоне переформовки

влияет на угол переформовки, поскольку вызывает большие напряжения, а следовательно, и изгибающий момент в дополнительном элементе профиля.

Заключение. В процессе роликовой формовки наблюдается эффект "переформовки", который заключается в том, что при выходе заготовки из калибра данного перехода угол подгибки продолжает увеличиваться до некоторого значения. Этот эффект проявляется в значительной степени при подгибке элементов профиля, у которых срединная линия поперечного сечения не является прямой (см. рис. 1, *а*), в противном случае (см. рис. 1, *б*) указанный эффект незаметен.

Возможной причиной возникновения указанного эффекта является действие продольных напряжений, возникающих в подгибаемой части профиля, которые эквивалентны изгибающему моменту, действующему на дополнительный элемент подгибаемой полки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование** изменения угла подгибки в процессе роликовой формовки швеллеров двух типов с разными размерами подгибаемых полок при различных режимах формообразования / С.В. Поворов // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2013. № 2. С. 53–59.

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

Сергей Владимирович Поворов,
avt76@yandex.ru

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.

2012. Объем 528 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-619-2 Цена 1500 р.

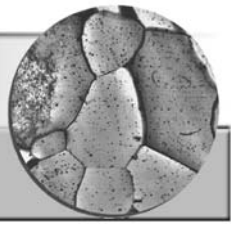
Изложены наукоемкие (высокие) технологии в машиностроении по всем технологическим переделам: производство материалов, отливок; получение заготовок обработкой давлением; сварочное производство; обработка заготовок; модификация поверхностных слоев деталей; сборочное производство.

Особое внимание уделено наукоемким технологиям при обработке заготовок (обработке на станках с ЧПУ и самообучающихся станках с адаптивным управлением), функционально-ориентированным и модульным технологиям, лазерным, электро-физико-химическим и нанотехнологиям.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий. Может быть полезна для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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



УДК 620.186.82

А.Е. Гвоздев *(Тульский государственный университет),*
М.И. Шкатов, А.С. Лукин *(ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат", г. Липецк)*

Эволюция микроструктуры при развитии динамической рекристаллизации в процессе горячей прокатки конструкционных сталей

В условиях, моделирующих горячую прокатку на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000 ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат", проведена оценка развития процессов динамической, метадинамической рекристаллизации после горячей деформации в конструкционных сталях.

Ключевые слова: критическая деформация; динамическая рекристаллизация; метадинамическая рекристаллизация; горячая деформация; бывшее аустенитное зерно.

In conditions simulating hot rolling on continuous broadband hot rolling mill 2000 of JSC "Novolipetsk steel", the estimation of dynamic processes, metadynamic recrystallization after hot deformation in structural steels is performed.

Keywords: critical deformation; dynamic recrystallization; metadynamic recrystallization; hot deformation; prior austenite grain.

Введение. Для значительных объемов стальной металлопродукции горячая прокатка является окончательной операцией, определяющей качественные и эксплуатационные характеристики металла.

В деформированном аустените в процессе горячей прокатки протекают высокотемпературные процессы, от которых, главным образом, зависит структура во время различных стадий прокатки. От степени развития этих процессов (упрочнение, разупрочнение, возврат, рекристаллизация, выделение второй или нескольких фаз) во многом зависят структура и свойства металлопродукции [1].

Осуществление деформации по оптимальному или неоптимальному температурно-деформационному режиму может привести к образованию разнозернистой или однородной структуры, получению устойчивой и развитой субструктуры.

Контроль упрочнения (наклепа) и разупрочнения (статическая, динамическая и метадинамическая рекристаллизация) при горячей деформации является основным механизмом регулирования процессов структурообразования. Изучение кинетики этих процессов в низкоуглеродистых сталях, а также их контроль связан с трудностями, так как при охлаждении до температур, допускающих применение количественной металлографии, проходит полиморфное превращение [2].

Поэтому для фиксации промежуточных структур, получаемых при горячей прокатке, используют ускоренное охлаждение аустенита, которое возможно только на малогабаритных образцах. Так, и при достаточно высокой скорости охлаждения горячекатаных листов необходимо учитывать не только динамическую рекристаллизацию аустенита, но и статическую рекристаллизацию по завершению деформации [2].

В работах [3, 4] предложена модель прогнозирования кинетики и зеренной структуры аустенита при динамической рекристаллизации по данным о кинетике статической рекристаллизации. Основополагающим принципом в этих моделях является физическое сходство статической и динамической рекристаллизации, различие состоит в условиях реализации этих процессов: после завершения деформации или в ходе деформации при монотонном росте степени деформации.

На основе этого принципа осуществлен расчет параметров динамической рекристаллизации при горячей прокатке конструкционных сталей и проведены исследования микроструктуры в условиях, моделирующих горячую прокатку на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки (НШС ГП) 2000 ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат" (ОАО "НЛМК").

Материал и методика исследований. Использовали конструкционные стали марок Ст3пс, 09Г2С и 08Ю, выплавленные в условиях ОАО "НЛМК". Химический состав этих сталей приведен в табл. 1.

Металл выплавляли кислородно-конвертерным способом и после непрерывной разливки слябы под-

1. Химический состав исследуемых сталей, % мас.

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N
Ст3пс	0,2	0,43	0,198	0,008	0,006	0,02	0,02	0,05	0,025	0,005
09Г2С	0,09	1,65	0,519	0,022	0,006	0,04	0,02	0,05	0,028	0,004
08Ю	0,047	0,21	0,021	0,016	0,019	0,03	0,02	0,04	0,039	0,003

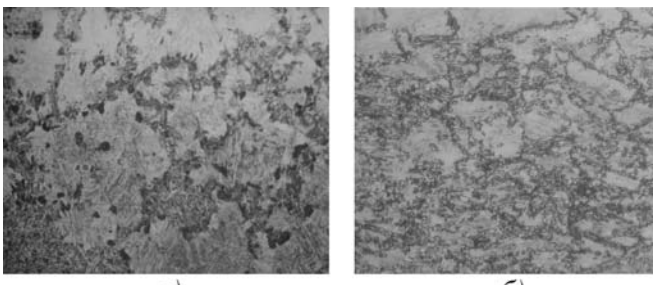
вергали горячей прокатке на НШС ГП 2000 ОАО "НЛМК". Образцы размерами (2,5...4,0)×40×150 мм вырезали из центральной части по ширине полосы.

Процесс горячей прокатки на непрерывных широкополосных станах зависит от многих технологических параметров, взаимосвязанных между собой (степень деформации, скорость прокатки, температурные режимы и т.д.). Проведение активных экспериментов в условиях действующего непрерывного производства на промышленных станах является трудоемким и затратным.

Морфология превращений, происходящих в структуре во время горячей прокатки на НШС ГП, обезличивается в процессе дальнейшего воздействия температур и деформаций в последующих клетях непрерывного стана. В данном исследовании использован метод физического моделирования [5], в ходе которого реализовано подобие деформационно-скоростных и температурных параметров горячей прокатки в чистовой группе клетей НШС ГП 2000.

Нагретые до 900 °С в лабораторной камерной печи образцы прокатывали на одноклетьевом двухвалковом лабораторном стане 200 с постоянной скоростью прокатки 0,2 м/с и затем подвергали закалке в баке с водой для фиксации ("заморозки") микроструктуры, полученной при горячей прокатке.

Геометрическими критериями подобия приняты относительная деформация $e = (h_0 - h_1)/h_0$ и параметр очага деформации $2l/(h_0 + h_1)$, где l – длина очага деформации; h_0, h_1 – толщина полосы на входе в клеть и выходе из нее соответственно.



а) *б)*

Рис. 1. Микроструктура бывших аустенитных зерен стали Ст3пс (×500):

а – нагрев до 900 °С и закалка в воде; *б* – нагрев до 900 °С, горячая прокатка с обжатием 41 % и закалка в воде; травление образцов в реактиве: 1...4 г пикриновой кислоты, 3...5 мл соляной кислоты, 95...100 мл этилового спирта

Постоянство размера зерна и однородность исходной структуры аустенита достигалось одинаковым режимом нагрева образцов в печи. Выдержка в течение 30 мин при температуре 900 °С обеспечивала получение однородной аустенитной структуры (рис. 1, *а*). Средний исходный размер зерна аустенита составлял (95±5) мкм.

После нагрева образцы извлекали из печи, температуру измеряли контактным пирометром "Tastotherm MP 2000" (диапазон измерения –200...1300 °С, погрешность измерения ±1 °С). За время переноса от печи к валкам (1,5...2,0 с) образец остывал до 880 °С.

Границы бывших аустенитных зерен в закаленных образцах выявлялись травлением в реактиве следующего состава: 1...4 г пикриновой кислоты, 3...5 мл соляной кислоты, 95...100 мл этилового спирта.

Металлографические исследования микроструктуры, результаты и обсуждение. Возможное развитие процесса статической рекристаллизации в момент переноса горячедеформированных образцов в бак закаливания оценивали по уравнению Аврами–Джонсона–Мела–Колмогорова:

$$X^{SRX} = 1 - \exp\left[-B\left(\frac{\tau}{\tau_{0,5}}\right)^n\right], \qquad (1)$$

где X^{SRX} – степень рекристаллизации; $\tau_{0,5}$ – время, за которое рекристаллизация проходит на 50 %, с; τ – текущее время, с; $B = -\ln 0{,}5$; n – коэффициент.

Значение $\tau_{0,5}$ определяли по экспериментально найденной зависимости для углеродистых и низколегированных сталей [6]:

$$\tau_{0,5}^{SRX} = 3{,}869 \cdot 10^{-4} \exp(-7{,}921 \cdot 10^{-5} Q_{rec})\, \varepsilon^{-3,7 d_0^{-0,137}} \times \dot{\varepsilon}^{-0,53} d_0^{0,996} \exp\left(\frac{Q_{rec}}{RT}\right), \qquad (2)$$

где ε – истинная деформация; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, $с^{-1}$; T – температура, К; d_0 – размер зерна аустенита перед деформацией, мкм; Q_{rec} – энергия активации рекристаллизации, зависящая от содержания элементов в стали, Дж; R – универсальная газовая постоянная, R = 8,31 Дж/(моль·К).

2. Расчетные параметры статической рекристаллизации X^{SRX}

Марка стали	X^{SRX}, % (прогноз)	Q_{rec}, Дж	$\tau_{0,5}$, с	n
Ст3пс	4,57	188029,79	25,46	0,83
09Г2С	1,63	243434,41	89,62	
08Ю	2,90	170330,08	44,32	

По результатам расчета (табл. 2) статическая рекристаллизация не получает развития для всех исследуемых марок стали за промежуток времени ≈1 с между горячей прокаткой и закалкой.

Однако полученная микроструктура после горячей деформации и закалки в воду полностью рекристаллизованная (рис. 2). Травление в реактиве, содержащем 3 %-ный раствор HNO_3 в спирте выявляет структуру только после прошедшего полиморфного превращения (зерна феррита и перлита).

Возможной причиной такого "быстрого" разупрочнения горячедеформированного металла является протекание процессов метадинамической рекристаллизации. Когда деформация прервана на стадии динамической рекристаллизации, имеется множество свежих, не успевших подвергнуться наклепу зародышей рекристаллизованных зерен, способных к росту в статических условиях сразу после прекращения горячей деформации. Этим обусловлена важнейшая для практики особенность метадинамической рекристаллизации – отсутствие инкубационного периода, рекристаллизационный рост зерен за короткое время охлаждения металла с температуры деформации [7].

Применение методов выявления аустенитного зерна по ГОСТ 5639 и специального реактива (1...4 г пикриновой кислоты, 3...5 мл соляной кислоты, 95...100 мл этилового спирта) позволило обнаружить бывшие аустенитные зерна (см. рис. 1, *а*). Так, по границам бывших аустенитных зерен после горячей прокатки стали Ст3пс на лабораторном стане с обжатием 41 % при 880 °С выявляются мелкие рекристаллизованные зерна, образование которых может быть связано с прохождением динамической рекристаллизации непосредственно во время горячей деформации (см. рис. 1, *б*).

В соответствии с методикой [4] проведен расчет параметра критической деформации ε_c для начала динамической рекристаллизации. Результаты представлены в табл. 3.

Отмечено, что при значениях истинной деформации 0,61, превышающей критическую деформацию $\varepsilon_c = 0{,}38$ для стали Ст3пс, в микроструктуре по границам бывших аустенитных зерен располагаются мелкие рекристаллизованные зерна, образовавшиеся в результате динамической рекристаллизации во время горячей прокатки.

Для сталей 09Г2С и 08Ю подобной морфологии в микроструктуре проката не выявлено, что также подтверждается расчетами критической деформации и динамической рекристаллизации (см. табл. 3). Процессы динамической рекристаллизации в этих сталях не получают развития, так как деформация при данных параметрах горячей прокатки не превышает критического значения.

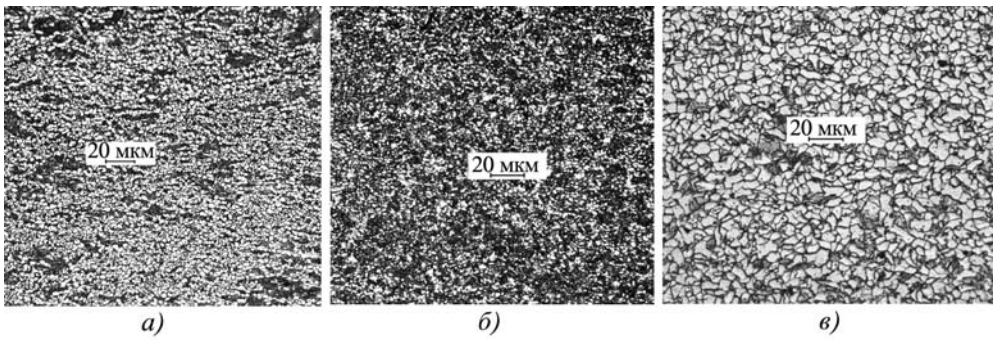


Рис. 2. Микроструктура исследуемых сталей (×200): *а* – Ст3пс; *б* – 09Г2С; *в* – 08Ю; травление образцов в 3 %-ном растворе HNO_3 в спирте

3. Результаты расчета

Марка стали	Обжатие при горячей прокатке, %	Скорость деформации, $с^{-1}$	Истинная деформация	Критическая деформация по модели [4]	Динамическая рекристаллизация по модели [3], %
Ст3пс	41,04	0,22	0,61	0,38	5
09Г2С	42,91	0,23	0,65	0,62	1
08Ю	28,21	0,19	0,38	0,35	0

Выводы

1. В условиях, моделирующих горячую прокатку на НШС ГП 2000 ОАО "НЛМК", возможно развитие динамической рекристаллизации на стали Ст3пс.

2. Инициирование процессов динамической рекристаллизации при горячей деформации начинается при достижении деформации, превышающей критическую деформацию, значение которой определяется условиями прокатки и маркой стали.

3. Разупрочнение и получение полностью рекристаллизованной структуры после горячей прокатки и последующей закалке связано с прохождением метадинамической рекристаллизации и процессом статической рекристаллизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гуляев А.П., Гуляев А.А.** Металловедение. М.: Альянс, 2011. 644 с.

2. **Зисман А.А., Сошина Т.В., Хлусова Е.И.** Выявление бывших аустенитных зерен и анализ кинетики метадинамической рекристаллизации аустенита низкоуглеродистой стали в условиях горячей прокатки // Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 3–8.

3. **Шкатов В.В., Шкатов М.И.** Моделирование кинетики динамической рекристаллизации низколегированных сталей при горячей деформации // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. Ч. 1. Липецк: ЛГТУ, 2007. С. 131–136.

4. **Шкатов В.В., Шкатов М.И.** Прогнозирование критической деформации, соответствующей началу динамической рекристаллизации в сталях // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 3. С. 59–61.

5. **Генкин А.Л.** Моделирование и оптимизация процесса горячей прокатки полос. М.: Ленанд, 2012. 168 с.

6. **Medina S.F.** Improved Model for Static Recrystallization Kinetics of Hot Deformed Austenite in Low Alloy and Nb/V Microalloyed Steels // Iron Steel Inst. Jpn. Int. 1992. Vol. 41. P. 774–781.

7. **Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М.** Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2005. 432 с.

Александр Евгеньевич Гвоздев, д-р техн. наук;
Максим Игоревич Шкатов, shkatovmax@mail.ru;
Александр Станиславович Лукин, канд. техн. наук

УДК 621.762

А.С. Петросян, В.С. Гукасян *(Государственный инженерный университет, г. Ереван)*

Технологические особенности получения армированного композиционного материала на основе Fe–Mo–S

Микрорентгеноспектральным анализом граничных слоев волокно–матрица изучен химический состав и однородность распределения элементов в зависимости от режимов экструзии композиционных материалов на основе Fe–Mo–S, армированных стальными волокнами. Ширина зоны взаимодействия волокно–матрица 2...4 мкм. Выявленные фазы соответствуют диаграмме состояния рассмотренной системы. Фрактографическими исследованиями установлен механизм разрушения армированного композиционного материала в условиях напряженно-деформированного состояния. Экструзией достигается равномерная по всей длине волокна пластическая деформация, вырывы волокон отсутствуют, что создает условия для полной реализации прочностных свойств армирующей фазы.

Ключевые слова: армированный композиционный материал; стальное волокно; экструзия; металлографическое исследование; прочностные характеристики.

The phase composition of composite materials on the basis of iron (Fe–Mo–S) reinforced with steel fibers is studied using X-ray spectrum microanalysis against the extrusion conditions. The fiber–matrix interaction zone width changed from 2 to 4 μm. The identified phases corresponded to the phase diagram of the studied sistem. Fractographic studies made it possible to establish mechanisms of structure destruction in the reinforced composites under deformation. The fibers are subjected to uniform plastic deformation along the whole length with no tear, which creates conditions for realization of the strenght properties of the reinforcing phase.

Keywords: reinforced composite material; steel fiber; extrusion; metallographic examiation; strength properties.

Цель работы – разработка технологии получения армированного композиционного материала Fe–Mo–S–сталь 55* с исследованием структурного анализа, включая изучение характера разрушения приведенного армированного материала.

Композиционный сплав на основе железа (Fe–Mo–S) рассматривается как материал антифрикционного назначения, который впервые используется для упрочнения волокнами. В качестве второго ком-

* Армирующая фаза.

1. Физические свойства сплава Fe–Mo–S

Пористость, %	Теплопроводность λ, Вт/(м·К)	Удельное электрическое сопротивление ρ, Ом·мм^2/м
20	40	0,030
0	15	0,098

понента шихты брали измельченную (фракция 0,16 мм) железосернистую лигатуру FeS, содержание серы ~35 %. Механическим смешиванием порошковых сплавов FeMo и FeS в смесителе типа "пьяная бочка" (τ = 4...6 ч) получали однородные составы шихт. Химический состав исследуемой матрицы (Fe–Mo–S): 0,8...1,0 % S; 5 % Mo; остальное – Fe.

Технология получения Fe–Mo–S-сплава описана в работе Г.Х. Карапетяна (Разработка и исследование технологии получения спеченных антифрикционных материалов, содержащих серу и селен, предназначенных для тяжелонагруженных узлов трения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. ИПН НАН Украины. Киев, 1975).

В табл. 1 и 2 приведены физико-механические свойства композиционного сплава Fe–Mo–S.

Разрабатывая технологию получения армированных композиционных материалов, необходимо предусмотреть следующие мероприятия:

1) сохранение прочности и целостности волокон на всех стадиях компактирования;

2) обеспечение смачивания и прочного сцепления между матрицей и волокнами;

3) равномерное распределение и ориентацию волокон в матрице.

Степень допустимой деформации зависит от прочности волокна σ_f, отношения l / d_f (l, d_f – длина и диаметр волокна) и объемной доли волокон V_f (рис. 1) (см. кн.: Порошковая металлургия. Спеченные и ком-

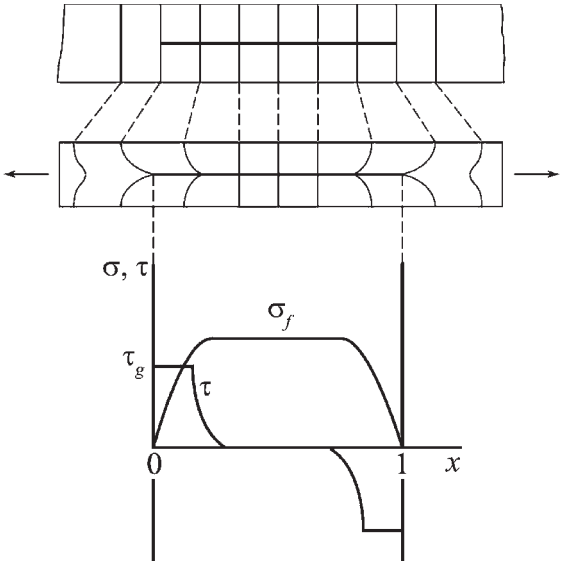


Рис. 1. Схема деформаций и распределения напряжений в дискретном волокне ($l > l_c$) вязкой матрицы при растяжении (l_c – критическая длина волокна)

позиционные материалы / под ред. В. Шатта. М.: Металлургия, 1983. 519 с.).

С увеличением V_f вероятность их разрушения возрастает. В основе взаимодействия компонентов материалов "металл–металл" лежат соответствующие диаграммы состояния систем (рис. 2).

По технологии температура экструзии 1000... 1100 °С. На рис. 2 показано, какие структурные соединения образуются при 950 °С, чтобы обосновать механические и антифрикционные свойства полученного композиционного материала (Fe–Mo–S)– сталь 55, MoS_2, FeS, Mo действуют на антифрикционные свойства исследуемой матрицы, а интерметаллидные соединения Fe_3Mo_2 или $FeMo_2$ упрочняют матрицу Fe–Mo–S.

Компактирование порошково-волокновой шихты в заготовки проводили на гидравлическом прессе

2. Механические свойства сплава Fe–Mo–S

Способ получения материала	Пористость, %	$\sigma_в$, МПа, при температуре, °С		$\sigma_{изг}$, МПа	Ударная вязкость, 10^2 Дж/м^2	НВ, МПа	δ, %
		20	150				
А	1	39,4	383	–	3,5	1700	5,0
–	20	200	182	270	0,5	780	2,3
–	1	423	415	–	4,0	1800	5,5
Б	20	236	218	314	0,8	850	3,2
В	1	380	371	–	3,4	1500	5,0
–	20	197	180	240	0,5	700	2,5

О б о з н а ч е н и я: А – механическая смесь компонентов (Fe+Mo+FeS); Б – на основе легированного порошка (FeMo), полученного синтезом оксидов Fe_2O_3 и MoO_3 с последующим восстановлением; В – на основе легированного порошка (FeMo), полученного синтезом оксидов Fe_3O_4 и MoO_3 с последующим восстановлением.

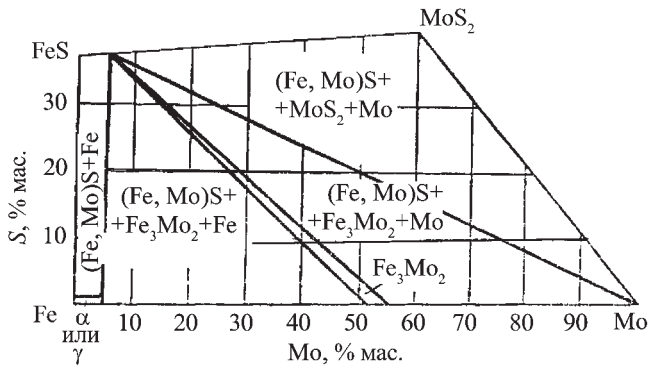


Рис. 2. Изотермический разрез состава Fe–Mo–S при 950 °C [3]

ПСЦ-125. В качестве армирующей фазы брали волокна марки стали 55 диаметром 280 мкм. Изготовлены экспериментальные образцы с разной относительной плотностью (остаточная пористость 18...20 %; диаметр 24 мм; $H_0 / D_0 = 1{,}5$, H_0, D_0 – высота и диаметр экспериментального образца; $l / d_f = 20 \ldots 30$).

Для получения армированных волокнами материалов разработана технология, которая включает в себя процессы формования и горячей экструзии [1, 2].

Сущность технологии заключается в следующем. Мерной резкой проволок получали волокна с заданным отношением длины l к диаметру d_f. Для стальных волокон $l / d_f = 20$ ($d = 0{,}28$ мм). Затем волокна обезжиривали и подвергали очистке, после чего просушивали и обжигали. Температура отжига 850...900 °C, время выдержки 1,0...1,5 ч (в среде водорода).

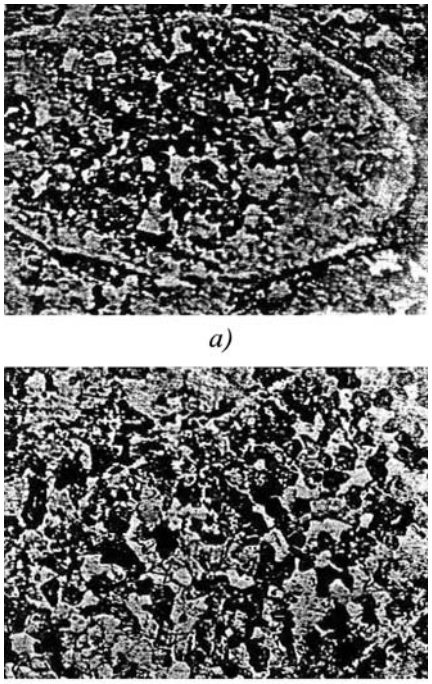
Композиция (Fe–Mo–S)–сталь 55 в исходном состоянии представляет собой шихту FeMo–FeS–сталь 55. Компоненты шихты в количестве 80 % об. Fe–Mo–S и 20 % об. стальных волокон загружают в смеситель и смешивают в течение 8...10 ч. Для их равномерного распределения шихту увлажняют спиртом (~1 %). Из шихты прессованием (500...600 МПа) изготовляют заготовки, которые затем нагревают и подвергают экструзии при 1000...1100 °C. Отжиг (нормализация) заключается в снятии внутренних напряжений и нормализации структуры.

Волокна в шихту Fe–Mo–S вводили порциями. По объемной доле определяли содержание волокон в композиции (20 % об):

$$G_{\text{в}} = G_{\text{м}} \frac{V_{\text{в}} \gamma_{\text{в}}}{V_{\text{м}} \gamma_{\text{м}}},$$

где $G_{\text{в}}$, $G_{\text{м}}$ – массы волокна и матрицы в композиции; $\gamma_{\text{в}}$, $\gamma_{\text{м}}$ – плотности волокна и матрицы; $V_{\text{в}}$, $V_{\text{м}}$ – объемы волокна и матрицы, занимаемые в композиционном материале.

При формовании изделий в пресс-формах волокна ориентируются в плоскостях нормальных и сжимающих сил, в самих же плоскостях они ориентированы хаотично (рис. 3).



а)

б)

Рис. 3. Микрофотографии композиций (Fe–Mo–S)–сталь 55 (×300):
а – поперечный срез; *б* – продольный срез

Химический состав и однородность распределения элементов в армированном композиционном материале определены микрорентгеноспектральным анализом с использованием рентгеновского микроанализатора JXA-5. Результаты анализа регистрируются в виде чисел импульсов в точке или по линии сканирования, а также записываются с помощью электронного потенциометра в виде кривых распределения интенсивности характеристического излучения.

Анализ проведен последовательно по каждому элементу с регистрацией интенсивности линии эталона (рис. 4). По оптимальным режимам получена композиция на основе сложной матрицы (Fe–Mo–S)–сталь 55.

Микрорентгеноспектральным анализом выявить зону взаимодействия этой композиции не удалось.

Одной из важных проблем материаловедения является установление связи между структурой и прочностью материала. Изучение строения изломов в настоящее время приобретает особое значение, так как оно дает важную информацию о механизме структурного разрушения материала (рис. 5).

Изучение процесса разрушения армированных материалов позволяет наблюдать в изломе не только трехмерное изображение зеренной структуры матрицы и волокна, но и структуру переходной зоны. На установке Nanolab 7 (ФРГ) исследован характер разрушения опытных образцов композиционного мате-

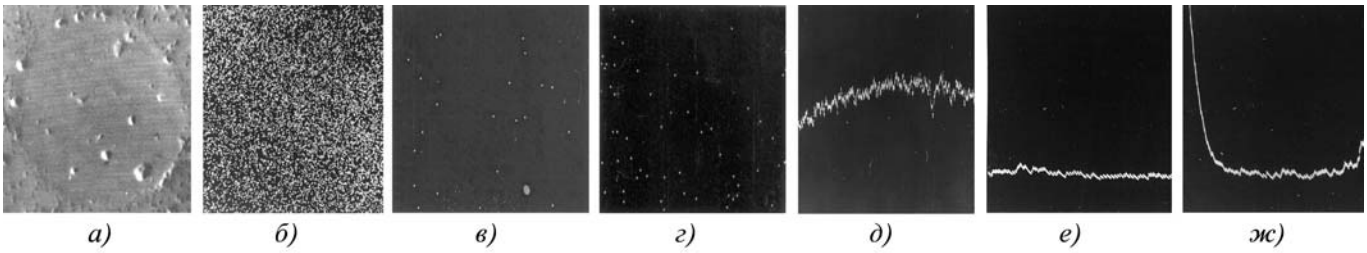


Рис. 4. Распределение элементов в композиции (Fe–Mo–S)–сталь 55 после экструзии 1000 °С. Изображение в рентгеновских лучах: *а* – в отраженных электронах; *б*, *в*, *г* – в лучах Fe, Mo и S; *д*, *е*, *ж* – изменение интенсивности рентгеновского излучения Fe, Mo и S соответственно (×600)

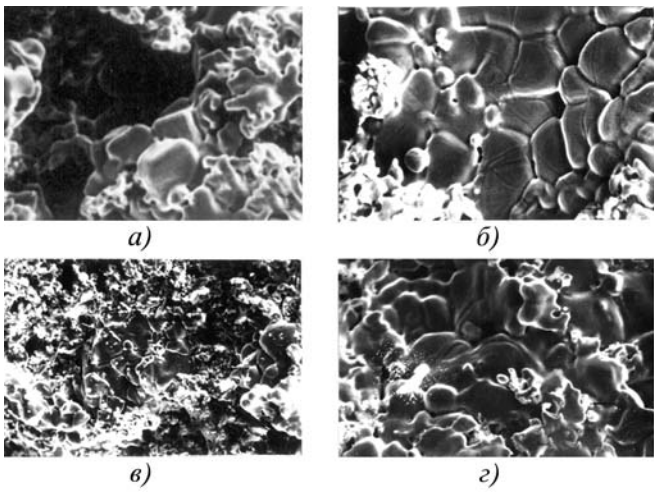


Рис. 5. Поверхность разрушения при ударе композиционного материала (Fe–Mo–S)–сталь 55:
а – структура излома (×1250); *б* – структура волокна (×1250); *в*, *г* – структура матрицы при увеличении ×500 и ×1250 соответственно

риала на основе порошкового сплава Fe–Mo–S. Изломы получены в результате ударного разрушения образцов размерами 10×10×55 мм с глубиной разреза 2,5 мм и радиусом закругления 2,5 мм (см. рис. 5).

На фрактограммах композиции (Fe–Mo–S)–сталь 55 зафиксированы поверхность разрушенных волокон стали 55 – плоский поперечный излом по механизму скола. Видны почти неискаженные границы зерен и линии пересечения фасеток. Четко выражены трещины по границам зерен (см. рис. 5, *а*, *в*). На рис. 5, *в*, *г* просматриваются соединения молибдена на темно-ямочном железном фоне. По-видимому, в процессе слияния микропор матрица и глобулярные включения сульфида разделяются по границам раздела металл–сульфид [3].

Микротвердость зоны контакта определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,196 Н (20 гс). Ее значения составляли 1700...2500 МПа, что выше, чем у железа (700...1000 МПа) и молибдена (1000...1300 МПа). Механические свойства композиции (Fe–Mo–S)–сталь 55: зоны взаимодействия – 2 мкм; $\sigma_в = 465...500$ МПа; $\delta = 9...16$ %; $\psi = 22...30$ %.

Коэффициент трения при смазке 0,006...0,016, допустимая нагрузка 2,5...3,0 МПа.

Заключение. Характер разрушения композиционного материала определяется в основном поведением арматуры в условиях напряженно-деформированного состояния. Ориентированность и прочность сцепления волокон с матрицей препятствуют образованию и развитию шеек на волокнах, что создает благоприятные условия для развития равномерной пластической деформации по всей длине волокна, а следовательно, 100%-й реализации его прочностных свойств, т.е. максимальных значений. Подтверждением этого вывода является и то, что ни на одной из фрактограмм не обнаружены вырывы волокон из матрицы, что говорит об эффективности экструзии для получения композиционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петросян А.С., Гукасян Л.С.** Композиционные материалы, армированные дискретными волокнами // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 12. С. 41–44.

2. **Петросян А.С.** Формирование структуры и свойств армированных композиционных материалов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2001. Т. 54. № 2. С. 195–198.

3. **Андриевский Р.А., Рагуля А.В.** Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005. 192 с.

Асмик Самсоновна Петросян, д-р техн. наук,
likmar2006@mail.ru;
Лилит Сергеевна Гукасян

УДК 620.170

А.И. Потапов *(Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург),*
Е.А. Батуева *(Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)*

Сопротивление деформации кремнемарганцовистых сталей для арматуры

Приведены результаты экспериментов по определению сопротивления деформации арматурных кремнемарганцовистых сталей марок 35ГС, 25Г2С и 08Г2С при температурах холодной, теплой и горячей деформации.

Ключевые слова: сопротивление деформации; кремнемарганцовистые стали; упрочнение; температура; степень и скорость деформации.

Results of experiences for determination of flow stress of silico-manganese steels 35GS, 25G2S and 08G2S for armature by temperature of cold, warm and hot deformation are presented.

Keywords: flow stress; silico-manganese steels; hardening; temperature; degree and velocity of deformation.

Сопротивление деформации – одна из важнейших реологических характеристик металлов и сплавов, определяющая энергосиловые параметры процессов обработки давлением, таких как прокатка, волочение. Эти процессы являются основными при производстве горячекатаной арматуры из стали марок 35ГС, 25Г2С и проволоки из стали 08Г2С. Анализ технической литературы показал отсутствие или недостаточность данных по сопротивлению деформации указанных сталей.

Эксперименты по определению сопротивления деформации сталей 35ГС, 25Г2С и 08Г2С проведены на пластометре кулачкового типа, установленном в Институте машиноведения УрО РАН, по методике, подробно описанной в работах [1, 2], с использованием осадки цилиндрических образцов диаметром (10+0,1) мм из сталей 35ГС и 08Г2С и диаметром (13+0,2) мм из стали 25Г2С. Высота h_0 всех образцов составляла (15+0,1) мм.

Образцы были изготовлены из катаных прутков и арматуры диаметром 12...17 мм в состоянии поставки.

Исходная твердость образцов 188...208 НВ для стали 35ГС, 184...208 НВ для стали 25Г2С и 173...177 НВ для стали 08Г2С.

Химический состав исследованных сталей приведен в таблице.

Осадку образцов осуществляли при температурах холодной (20; 300; 400 °С), теплой (500; 600; 700 °С) и горячей (800; 900; 1000; 1100; 1200 °С) деформации и при скоростях деформации ξ, равных 1; 10 и 50 $с^{-1}$, которые оставались постоянными в течение всего процесса осадки благодаря соответствующему профилю кулачков пластометра и конструкции привода пластометра, обеспечивающего постоянство скорости вращения кулачкового вала.

Скорость деформации рассчитывали как $\xi = v / h_i$, где v – скорость перемещения ползуна с деформирующим бойком, мм/с; h_i – текущая высота образца, мм.

Нагрев образцов для испытаний осуществляли в электрической печи. Время нагрева – от 50 до 30 мин в зависимости от температуры нагрева. Образцы перед нагревом помещали в круглый металлический контейнер между деформирующими бойками. Пространство между образцом и стенками контейнера заполняли теплоизоляцией (каолиновой ватой), что несколько удлиняло процесс нагрева, но практически предотвращало охлаждение образца перед осадкой (не более 3...4 °С).

Для обеспечения равномерной деформации и напряженного состояния металла образца, близкого к одноосному, использовали смазки, состав которых изменяли в зависимости от температуры испытания:

при 20...400 °С – сульфитно-спиртовая барда + графит;

при 500...700 °С – поваренная соль NaCl;

при 800 °С – соль NaCl+молотое стекло;

при 900...1200 °С – молотое стекло.

Пластометр оснащен системой сбора и обработки информации на базе ПЭВМ Pentium 3 с быстродействующим аналого-цифровым преобразователем АЦП

Химический состав исследованных сталей, % мас.

Сталь	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu
35ГС	0,34	0,81	0,98	0,011	0,012	0,07	0,06	0,08
25Г2С	0,26	0,76	1,42	0,015	0,018	0,08	0,11	0,09
08Г2С	0,06	0,74	1,82	0,002	0,011	0,008	0,05	0,07

PCI-1713, пакетами GeniDAQ и WinDAQ в ее составе с программным обеспечением GENIE (Advantech). Используемые программные комплексы сбора и регистрации данных осуществляли вывод результатов испытаний в формате Microsoft Excel в виде графиков изменения силы деформации (измерялась месдозой) и перемещения ползуна (измерялось ходомером) по ходу осадки. Указанные графики обрабатывали по специально разработанной программе.

В результате были получены кривые течения (упрочнения) сталей – кривые изменения сопротивления деформации σ_s с увеличением истинной (логарифмической) деформации при осадке $e = \ln h_0 / h_i$ (h_0 и h_i) – начальная и текущая высота образца) при фиксированной температуре T и скорости деформации ξ.

Результаты исследования – кривые упрочнения сталей 35ГС, 25Г2С и 08Г2С $\sigma_s = f(e)$ представлены на рис. 1.

Из сопоставления кривых видно, что сталь 08Г2С с меньшим содержанием углерода и меньшей исходной твердостью имеет более низкое сопротивление деформации, чем стали 35ГС и 25Г2С. Особенно это проявляется при низких температурах (ниже 600...700 °С). При температурах горячей обработки все исследуемые стали имеют примерно одинаковый уровень σ_s.

Характер кривых течения для всех исследуемых сталей практически одинаков: кривые имеют максимум в интервале степеней деформаций e = 0,30...0,45, который более четко проявляется при температурах холодной и теплой деформации.

На первом этапе осадки (до достижения указанной степени деформации) происходит интенсивное упрочнение металла в результате увеличения плотности дислокаций (наклепа), а при дальнейшем увеличении степени деформации – динамическое разупрочнение [3] за счет динамического возврата и динамической полигонизации (при температурах ниже температуры рекристаллизации обработки) и процессов динамической рекристаллизации (при температурах горячей обработки).

При температурах горячей деформации кривые течения становятся более пологими, незначительное упрочнение (повышение σ_s) наблюдается только на начальном этапе осадки. При температурах 900 °С и выше поведение всех сталей близко к поведению жесткопластических сред.

При скоростях деформации ξ = 1 и 10 $с^{-1}$ максимум на кривых $\sigma_s - e$ с повышением температуры смещается в сторону меньших значений деформаций: стадия деформационного упрочнения сокращается, а динамическое разупрочнение начинается раньше. При более высокой скорости (50 $с^{-1}$), более характерной для прокатки и волочения, положение максимума практически не зависит от температуры деформации, а разупрочнение происходит более интенсивно.

Построенная для максимальных значений зависимость σ_s от температуры (рис. 2) свидетельствует о том, что сопротивление деформации всех исследованных сталей в интервале температур 20...300 °С изменяется несущественно. При температурах 400 °С и выше уровень σ_s монотонно снижается с небольшим нарушением этой монотонности в интервале фазовых превращений в сталях. Данные позволяют сделать вывод, что силовые параметры процессов теплой и горячей

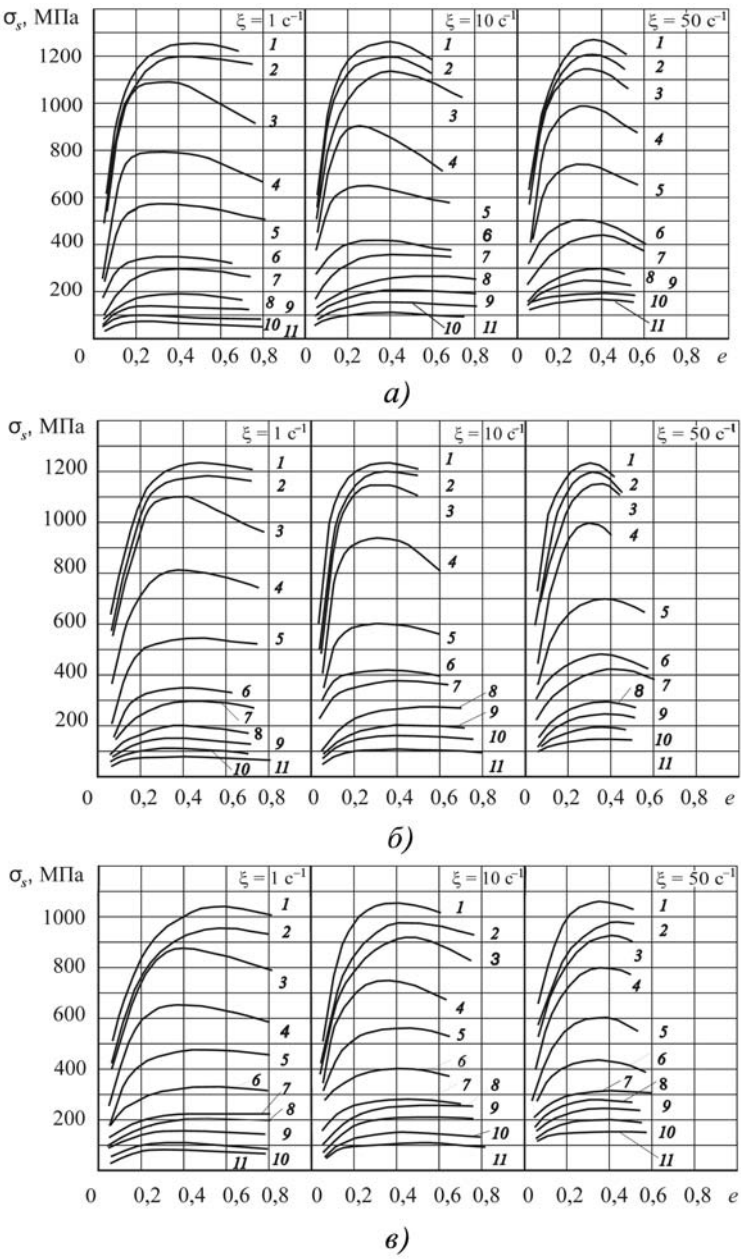


Рис. 1. Кривые упрочнения сталей 35ГС (*а*), 25Г2С (*б*) и 08Г2С (*в*) при осадке с различными скоростями деформации ξ при температурах *T*, °С: *1* – 20; *2* – 200; *3* – 400; *4* – 500; *5* – 600; *6* – 700; *7* – 800; *8* – 900; *9* – 1000; *10* – 1100; *11* – 1200

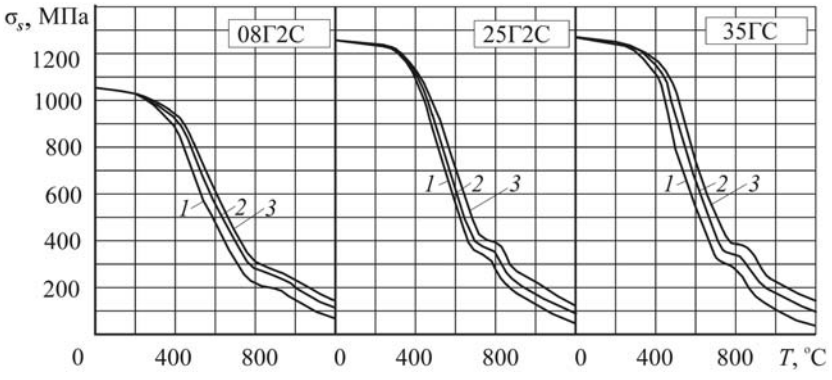


Рис. 2. Температурная зависимость σ_s исследуемых сталей при скоростях деформирования ξ:
1 – 1 $с^{-1}$; *2* – 10 $с^{-1}$; *3* – 50 $с^{-1}$

обработки давлением сталей существенным образом определяются температурой обработки.

Существенное влияние на уровень σ_s и характер упрочнения исследуемых сталей оказывает скорость деформации ξ. С увеличением скорости сильнее проявляется максимум на кривых течения, а уровень сопротивления деформации возрастает.

Для оценки влияния скорости на уровень σ_s использовали условный коэффициент скоростного упрочнения *n*, который определили как отношение величины σ_s при наибольшей достигнутой в опытах скорости (ξ = 50 $с^{-1}$) к величине σ_s при наименьшей скорости (ξ = 1 $с^{-1}$).

На рис. 3 представлены графики изменения *n* в зависимости от температуры испытания. Их анализ свидетельствует о том, что влияние скорости на уровень σ_s неоднозначно и зависит от температуры деформации.

При температуре до 300 °С повышение скорости деформации практически не влияет на уровень σ_s (коэффициент *n* близок к единице). При увеличении температуры до 900 °С коэффициент *n* плавно возрастает до 1,4...1,6. При дальнейшем повышении температуры до 1100 °С увеличение скорости приводит к более резкому росту сопротивления деформации: коэффициент *n* возрастает интенсивно. При достижении температуры 1200 °С коэффициенты скоростного упрочнения для всех сталей не изменяются, а остаются на том же уровне, что, вероятно, обусловлено быстропротекающей рекристаллизацией обработки.

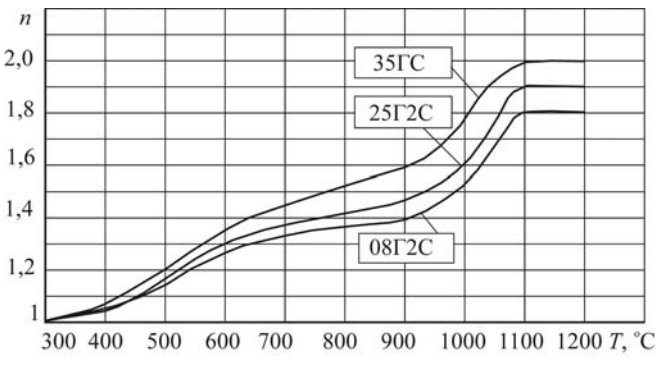


Рис. 3. Зависимость коэффициента скоростного упрочнения *n* исследуемых сталей от температуры испытания *T*

Характер изменения скоростного коэффициента одинаков для всех исследуемых сталей и отличается только значением: у сталей с более высоким содержанием углерода скоростное упрочнение несколько выше.

Выводы

1. Установлены закономерности изменения уровня сопротивления деформации арматурных сталей в зависимости от степени, температуры и скорости деформации при изменении последней в пределах 1...50 $с^{-1}$.

2. Кривые течения имеют максимум при степенях деформации 0,35...0,45, после которого происходит динамическое разупрочнение сталей. Указанный максимум на кривых течения более четко проявляется при температурах теплой деформации, а также с увеличением скорости деформации.

При температурах горячей деформации (1000... 1200 °С) и небольших скоростях исследуемые стали ведут себя как жесткопластические среды без существенного изменения σ_s с ростом степени деформации. С повышением скорости деформации упрочнение сталей возрастает.

3. Влияние скорости деформации имеет сложный характер: при температурах холодной деформации (20...300 °С) уровень σ_s практически не зависит от скорости. С увеличением температуры от 400 до 1100 °С скоростное упрочнение возрастает, но при дальнейшем повышении температуры деформации до 1200 °С коэффициент скоростного упрочнения не изменяется.

4. Результаты экспериментов могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров процессов прокатки арматуры из сталей 35ГС и 25Г2С, а также волочения проволоки из стали 08Г2С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Потапов А.И., Мазунин В.П., Двойников Д.А., Кокович Е.А.** Методика исследования сопротивления деформации на пластометрическом комплексе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. № 9. Т. 76. С. 59–63.

2. **Потапов А.И., Харитонин С.В.** Сопротивление деформации титановых сплавов при температурах теплой и горячей обработки давлением // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 3. С. 18–22.

3. **Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М.** Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. М.: МИСиС, 2005. 432 с.

Алексей Иванович Потапов, канд. техн. наук,
potapov_ai@list.ru;
Елизавета Александровна Батуева

УДК 621.77.04

Ю.С. Додин, Н.П. Сигаев *(Новомосковский институт (филиал) Российского химико-технологического института им. Д.И. Менделеева)*

Анализ диаграммы процесса прессования алюминиевой тубы или баллона

Изложены результаты исследования силы прессования алюминиевых туб и баллонов на ряде промышленных предприятий. Приведен анализ силовых параметров процесса, получена эмпирическая зависимость для максимальной силы прессования. Предложена предварительная настройка пресса по силе холостого хода, что позволяет снизить себестоимость изделия.

Ключевые слова: обратное прессование; сила; температура; деформация; настройка пресса.

The results of research of pressing force of aluminum tubes and bottles at some plants are stated. The analysis of power parameters of the process, the empirical relationship for maximum force of pressing are described. Preliminary press settings to improve idle is suggested. This allows to decrease product cost.

Keywords: inverse extrusion; force; temperature; deformation; press settings.

Широко применяемые в настоящее время для упаковки различных веществ алюминиевые тубы и баллоны изготовляют методом холодного обратного прессования на горизонтальных кривошипных прессах различной конструкции. Необходимым этапом разработки рациональной технологии получения подобных изделий является детальное изучение процесса прессования на существующих производствах. Наиболее важным параметром этого процесса является сила прессования; исследованию этого параметра в промышленных условиях посвящена настоящая работа.

Обычно при прессовании туб и баллонов применяют плоские круглые заготовки (рондоли) из алюминия технической чистоты, прошедшие отжиг для снятия наклепа после вырубки и ожиривание в стеорате цинка для уменьшения трения алюминия при контакте с инструментом.

Для записи силы в процессе прессования на пуансонодержателе была смонтирована измерительная схема, главными элементами которой являются тензорезисторы. Исследования прессования алюминиевых баллонов и туб, проведенные на промышленных предприятиях (в городах Новомосковск, Донской, Тосно, Добеле), производящих эти изделия, позволили сделать следующие выводы.

Диаграммы прессования баллонов и туб из рондолей равного диаметра и одинаковых марок алюминия при идентичных технологиях подготовки практически не различаются. Характер указанных диаграмм не зависит от диаметра изделия.

На рис. 1 приведена диаграмма, полученная осциллографированием процесса холодного прессования алюминиевой тубы диаметром 35 мм (толщина рондоли $h = 4$ мм, толщина стенки тубы $\delta = 0{,}15$ мм, толщина дна тубы $h_k = 1{,}1$ мм) с характерными точками на ней. На этом рисунке: $P_{max} = 850$ кН – максимальная сила в процессе прессования; $P_к = 610$ кН – сила в конце прессования; t_p – время приложения нагрузки; t_b – время разгрузки.

Как видно из диаграммы, после достижения силой прессования максимального значения P_{max} происходит ее резкое снижение. Это объясняется деформаци-

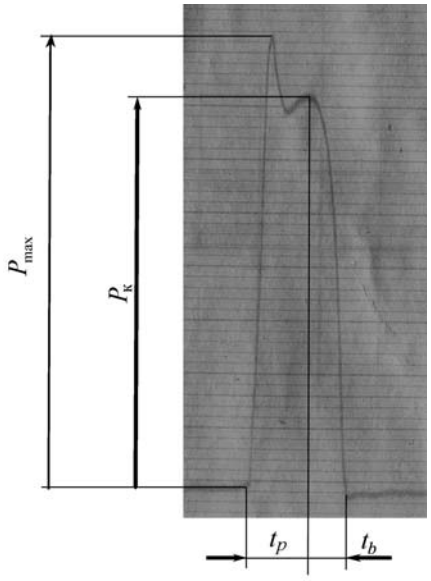


Рис. 1. Осциллограмма обратного прессования алюминиевой тубы

онным разогревом холодной рондоли. Время прессования, например, при 86 ударах в минуту, составляет $t_p = 0{,}12$ с, выделившееся за это время тепло не успевает рассеиваться, и заготовка разогревается, что приводит к уменьшению сопротивления деформации алюминия (см. кн.: Гун Г.Я., Яковлев В.И. и др. Прессование алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1974. 365 с.).

Однако срабатывает указанный фактор с некоторым запаздыванием из-за блокирования дислокаций (плотность дислокаций у отожженного алюминия составляет 10^7 см$^{-2}$) атомами примесей железа и кремния, всегда содержащихся в технически чистом алюминии. Для начала движения дислокаций, представляющего собой пластическое течение, в этом случае требуется большая сила (энергия нарушения укладки атомных слоев алюминия $\gamma = 200$ эрг/см^2 = 20 Дж/м^2, у коррозионно-стойкой стали $\gamma \approx 20$ эрг/см^2 = 2 Дж/м^2).

Скольжение свободных от примесных атмосфер дислокаций требует меньших напряжений вплоть до их торможения, т.е. до начала деформационного упрочнения. Таким образом, с началом появления развитого пластического течения сила прессования уменьшается.

Снижению силы прессования способствует уменьшение скорости деформации с 0,15 м/с в начале рабочего хода до 0 в конце прессования. С уменьшением высоты рондоли снижается сопротивление истечению металла в зазор между пуансоном и матрицей, формирующий стенку тубы или баллона. Но с уменьшением толщины заготовки увеличивается геометрический параметр d / h, что требует повышения силы прессования.

От соотношения указанных факторов и зависит сила к концу прессования $P_к$. Так, если снижение толщины h_k невелико, то падение силы продолжается до конца процесса прессования (см. осциллограмму на рис. 3), а если оно существенно, то сила прессования к концу процесса увеличивается до $P_к$ (см. осциллограммы на рис. 1, 5). Параметры P_{max} и $P_к$ являются

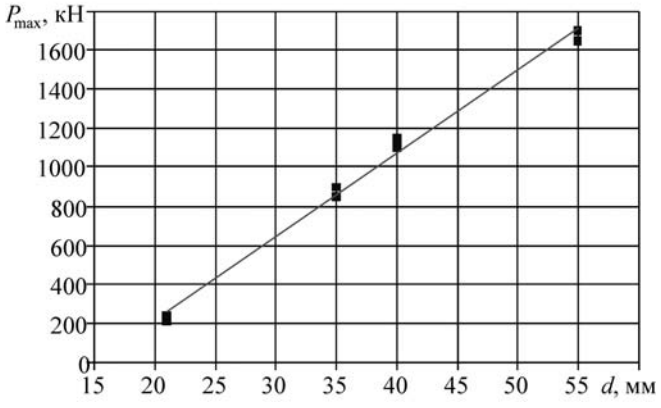


Рис. 2. Эмпирическая зависимость максимальной силы прессования от диаметра рондоли

основными силовыми характеристиками процесса прессования алюминиевых изделий, подобных тубам и баллонам.

Анализ полученных результатов показал, что сила P_{max} определяется деформационной работой, идущей на разогрев рондоли до температуры $T_{пр}$, при которой начинается интенсивное пластическое течение прессуемого материала. Теоретическое определение указанной силы с учетом неизотермического нагружения – задача достаточно сложная.

На рис. 2 приведены результаты замеров максимальной силы прессования P_{max} для различных диаметров рондолей d, применяемых в промышленности.

Зависимость максимальной силы прессования P_{max} от диаметра рондоли d хорошо аппроксимируется прямой линией при $d \geq 20$ мм:

$$P_{max} = 72{,}742\ d - 638{,}52\ . \qquad (1)$$

Среднее давление по поверхности контакта пуансона с алюминием в момент начала интенсивного пластического течения составляет в зависимости от параметра d / h 700...900 МПа для 20 мм < d < 60 мм.

Зная работу деформации, можно определить температуру разогрева рондоли (см. кн.: Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 496 с.)

$$T_{пр} = \eta \frac{A}{cm}, \qquad (2)$$

где A – работа деформации, Дж; c = 880 Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость алюминия; m – масса рондоли, кг; η – коэффициент выхода тепла.

На рис. 3 приведены осциллограммы силы прессования P и перемещения S пуансона, записанные одновременно при изготовлении тубы диаметром 40 мм.

Датчик перемещения представляет собой консольную балочку большой гибкости, укрепленную на корпусе пресса. При изгибе балочки ползуном пресса собранная на ней измерительная схема из резисторов подает сигнал на регистрирующее устройство.

На рис. 3 показана осадка рондоли $\Delta h = h - h_k$ и упругая деформация нагруженных узлов пресса Δh_y.

Полученная осциллограмма позволяет построить диаграмму прессования в координатах P–S. На рис. 4 приведена диаграмма прессования рондоли диаметром 40 мм, построенная для удобства использования в координатах P–h_k.

Площадь под кривой $P(h_k)$ равна работе деформации рондоли. Например, площадь диаграммы прессования тубы диаметром 40 мм при толщине дна h_k = 1,2 мм и массой m = 0,0132 кг эквивалентна работе деформации A = 2620 Дж. Предполагая, что на нагрев затрачивается около 90 % работы деформации, используя формулу (2), можно вычислить температуру в конце прессования: $T_к$ = 203 °С.

Температура туб после прессования составила 150...170 °С. Расхождение с расчетным значением температуры объясняется быстрым остыванием тубы

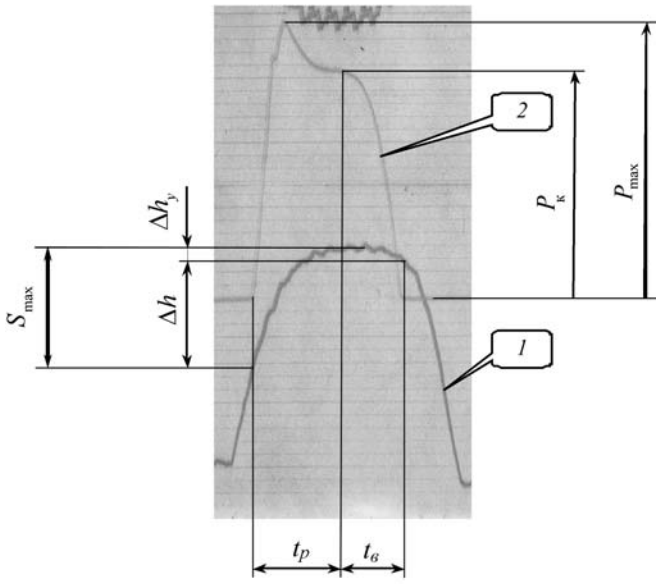


Рис. 3. Осциллограммы силы прессования рондоли (*1*) и перемещения пуансона (*2*)

ввиду ее тонкостенности. Температура конца процесса прессования $T_к \approx 150...160$ °С. При других размерах рондоли будет другой силовой режим прессования, но температурный режим не изменится.

Экспериментально установлено (см. кн.: Эрхард Д. Холодное прессование. М.: Машиностроение, 1968. 146 с.), что предварительный подогрев заготовок уменьшает силу прессования до 42...55 % для материалов с постоянно падающей диаграммой холодного прессования. Происходит это потому, что предварительный подогрев снижает значение P_{max}. Если при холодном прессовании $P_{max} < P_к$, что возможно при достаточно тонком дне туб или баллонов

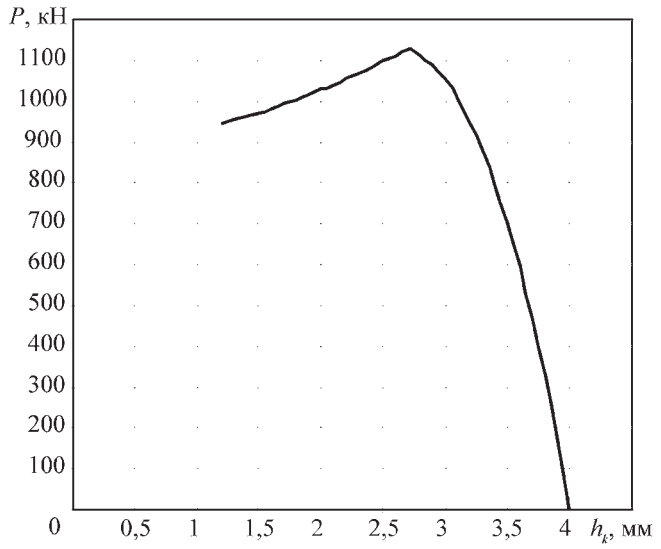


Рис. 4. Диаграмма прессования рондоли диаметром 40 мм

($d / h \geq 50$), предварительный подогрев эффекта не даст. Эффект даст переход к горячему прессованию, однако при этом теряются все преимущества холодного прессования.

При исследовании влияния температурного режима на силу P_{max} установлено, что при запуске холодного пресса значительная часть деформационного тепла идет на разогрев оснастки (пуансон, матрица и др.), поэтому разогрев рондоли до установившегося режима происходит постепенно. Ниже приведены результаты обработки осциллограмм прессования тубы диаметром 40 мм:

t, мин	0	1	2	3	4	5	6
P_{max}, кН	1300	1200	1200	1180	1170	1170	1170

Характер диаграмм по мере разогрева оснастки не меняется, изменяется только значение P_{max}, которое плавно снижается с течением времени t до установившейся величины. Одновременно непрерывно увеличивается длина тубы до требуемого значения.

Зная температурный режим прессования и размеры готовой тубы или баллона, можно с достаточной для инженерных расчетов точностью определить значение $P_к$. Для подобных расчетов разработаны различные способы (например, см.: Додин Ю.С. Прессование алюминиевых баллонов из квадратных заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 9. С. 3–5).

На рис. 5 показаны осциллограммы прессования тубы диаметром 35 мм. При этом регистрировались сила на пуансоне и ход пуансона (верхнюю кривую – дублирующий сигнал во внимание можно не принимать). Кривые *1* и *2* соответствуют холостому ходу пуансона, т.е. работе пресса без рондоли; кривые *3* и *4* – прессованию рондоли. На осциллограммах указаны максимальные значения силы прессования и перемещения пуансона. Максимальная сила холостого хода $P_{x\,max}$ велика и получить необходимое значение h_k без соответствующего значения $P_{x\,max}$ невозможно.

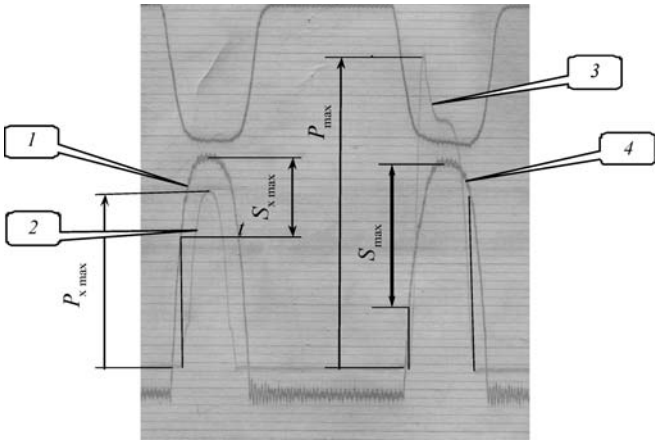


Рис. 5. Осциллограммы холостого (*1*, *2*) и рабочего ходов (*3*, *4*)

Сила $P_{пр}$, создаваемая прессом в конце рабочего хода, пропорциональна сумме упругой деформации нагруженных узлов при холостом ходе Δh_y и толщины дна h_k:

$$P_{пр} = C_{пр}(\Delta h_y + h_k) = P_{x\,max} + C_{пр}\,h_k\ ,$$

где $C_{пр}$ – жесткость узлов пресса, воспринимающих нагрузку (проще и точнее величину $C_{пр}$ определять экспериментально).

Предварительная настройка пресса заключается в выборе величины $P_{x\,max}$ при заданном значении h_k. Практически настройка осуществляется смещением регулировочного клина, что позволяет приблизить или удалить начальное положение пуансона относительно матрицы, добиваясь требуемого значения h_k за счет изменения максимальной величины холостого хода. Контролируется правильность настройки по длине готового изделия.

Параметры $P_{x\,max}$ и h_k связаны между собой зависимостью $P_{max} = P_{x\,max} + C_{пр}\,h_k$, которую удобно решать графически. Для этого на диаграмму прессования (см. рис. 4) следует нанести (штриховая линия) упругую характеристику пресса $P = C_{пр}\,h_k$ и сдвинуть ее вдоль оси P до пересечения с кривой прессования в точке с абсциссой h_k; ось P указанная характеристика пересекает в точке с ординатой $P_{x\,max}$.

Если на прессе установить устройство, регистрирующее силу прессования, то предварительную настройку пресса можно контролировать по силе холостого хода, что проще контроля по длине изделия и легко поддается автоматизации.

Выводы

1. Диаграммы прессования баллонов и туб из рондолей равного диаметра и одинаковых марок алюминия при идентичных технологиях подготовки практически не различаются.

2. Характер указанных диаграмм не зависит от диаметра изделия.

3. Интенсивное пластическое течение начинается при силе прессования P_{max}, существенно большей силы в конце прессования $P_к$.

4. Температурный режим прессования для исследованных рондолей не зависит от их размера; интенсивное пластическое течение начинается при $T_{пр}$ = 150...160 °С

Практическая ценность работы определяется полученной эмпирической зависимостью (1) для расчетов величины P_{max}, а также предложенной методикой предварительной настройки пресса по силе холостого хода.

Юрий Сергеевич Додин, канд. техн. наук;
Николай Петрович Сигаев, канд. техн. наук,
niksigaev@yandex.ru

УДК 621.7.01

Е.О. Некрасова *(ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат"),*
В.А. Харитонов *(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)*

Использование компьютерного моделирования для анализа процесса винтовой протяжки заготовки из высокоуглеродистой стали

Исследовано влияние способа винтовой протяжки на измельчение структуры при его реализации для производства длинномерных изделий с регламентированным комплексом механических свойств.

Ключевые слова: немонотонная деформация; проволока; винтовая протяжка.

The influence of screw passing process on reduction of structure during it realization for production of long products with regulated complex of mechanical properties is investigated.

Keywords: nonmonotonic deformation; wire; screw passing.

В металлургической области конкурентоспособность любого вида продукта определяется показателями качества и прежде всего механическими свойствами. Последние зависят от состава структуры и напряжений в готовом изделии.

Структура и напряженное состояние формируются в изделии применяемым в технологии способом обработки металлов давлением (ОМД), который должен обеспечить равномерную, высокоинтенсивную, существенно немонотонную деформацию при высоком уровне гидростатического давления. Предпочтительной является мелкодисперсная структура.

Разработка материалов с ультрамелкодисперсной структурой в последние годы становится одной из актуальных задач, поскольку открывает перспективы улучшения существующих и создания новых конструкционных и функциональных материалов.

Для получения ультрамелкодисперсных структур необходимо обеспечить формирование большеугловых границ зерен, а также – однородное наноструктурное состояние по всему объему образца для обеспечения стабильности свойств полученных заготовок [1].

Эти требования не могут быть реализованы путем использования традиционных методов ОМД. В частности, одним из основных способов получения проволоки остается волочение. Данный метод является квазимонотонным, так как заготовка вытягивается в одном направлении – вдоль продольной оси, и в этом случае повороты главной оси тензора деформации относительно этого направления незначительны.

Указанные требования могут быть реализованы при использовании методов интенсивной пластической деформации (ИПД), которые являются комбинацией традиционных процессов ОМД с наложением простого сдвига.

В работе [2] в качестве метода ИПД предложен метод, который состоит в том, что призматический образец продавливают через матрицу с каналом, содержащим два призматических участка, разделенных участком винтовой формы.

В ходе обработки материал испытывает интенсивный сдвиг при сохранении идентичности начального и конечного сечений образца, что позволяет осуществлять деформацию многократно. Процесс деформации при такой схеме нагружения осуществляется при высоком уровне гидростатического давления в очаге деформации.

Проведенный анализ методов изучения винтовой протяжки показал, что применяемые методы носят специализированный экспериментально-расчетный характер.

В работе [2] приведен развитый математический аппарат, позволяющий определить напряженно-деформированное состояние, характерное для процесса винтовой протяжки, а также поле скоростей течения металла и силы винтовой протяжки.

Учитывая сложный характер движения материальных частиц (движение поперечного сечения заготовки как целого и "перетекание" или движение внутри каждого сечения), интенсивность деформации для исследуемого процесса определяют из соотношения:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r}{R} \mathrm{tg}\beta_{\max}, \qquad (1)$$

r – расстояние до материальной частицы от оси матрицы; R – расстояние до края поперечного сечения заготовки; β_{max} – максимальное значение наклона винтовой линии канала к оси протяжки.

Также в работах [2–4] приведены данные, подтверждающие возможность создания в обрабатываемых методом винтовой протяжки заготовках высоких сдвиговых деформаций, а также получения мелкодисперсных структур и улучшения механических свойств. Однако результаты исследований носят теоретический характер и предназначены для непромышленного узкоспециализированного применения для обработки небольших образцов, размеры которых сопоставимы с размерами матриц для осуществления протяжки.

Цель данной работы – разработка подхода, сочетающего в себе применение накопленных результатов расчетного анализа [4] и методов численного моделирования с использованием комплекса для компьютерного моделирования Deform 3D. При этом основной решаемой задачей является оценка возможности реализации изучаемого способа в реальных условиях при производстве длинномерных изделий с регламентированным комплексом механических свойств. Для этого моделирование проведено на образцах, длина которых в несколько раз превышает размер длины винтового участка канала матрицы.

В программном комплексе Deform 3D смоделирован процесс деформации призматической заготовки через матрицу, содержащую винтовой участок. В среде Deform создана трехмерная модель (рис. 1). Моделировали протягивание длинномерной заготовки через винтовой канал.

При моделировании введены следующие данные:

- тип заготовки – призматическая;
- материал заготовки – сталь AISI 1070 (аналог марки сталь 70) – механические характеристики исходного материала взяты из встроенной библиотеки материалов Deform 3D;
- моделируемый процесс – упругопластическая деформация;
- технологические параметры: скорость поступательного движения заготовки 0,2 м/с;
- геометрические размеры заготовки: прямоугольник 2×4 мм, длина 300 мм;
- вид разбиения заготовки – тип конечных элементов – тетраэдр; число элементов 50 000.

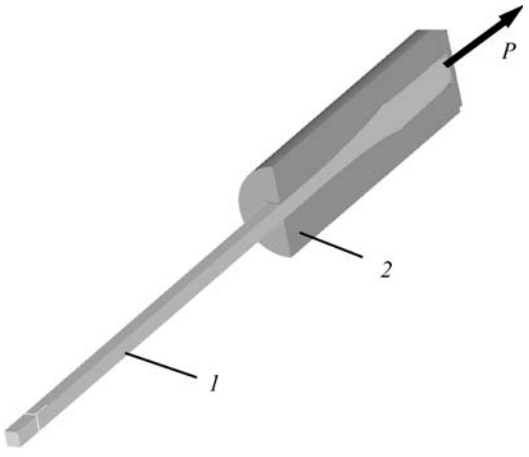


Рис. 1. Схема моделируемого процесса:
1 – заготовка; *2* – рабочий инструмент; *P* – тянущая сила

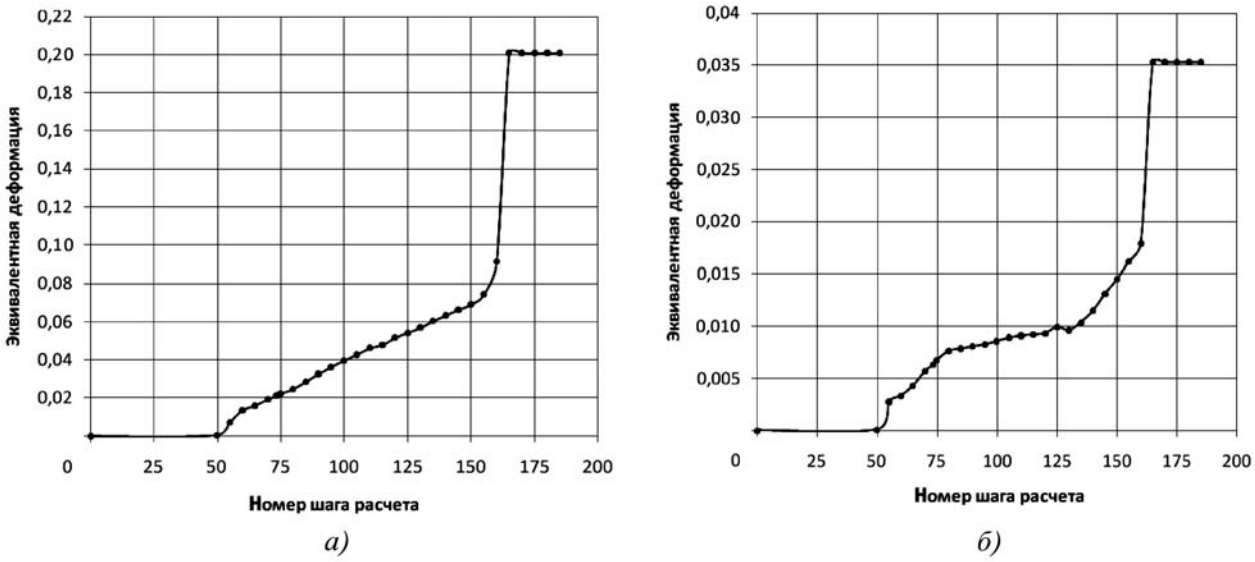


Рис. 2. Распределение накопленной деформации по сечению заготовки в направлении тока металла:
а – поверхностные слои; *б* – центральные слои

Варьируемыми параметрами являются: длина винтового участка матрицы и угол между входным и выходным сечением матрицы.

При моделировании приняты допущения:

– рабочий инструмент рассматривается как абсолютно жесткое тело с постоянной температурой 20 °С;

– трение между заготовкой и инструментом постоянно на всей поверхности и подчиняется закону Зибеля, коэффициент трения составляет 0,08;

– деформация осуществляется при комнатной температуре, теплопередачи между заготовкой и инструментом не происходит.

Обязательным является учет возможности разрушения заготовки при определенных параметрах. Для этого в расчет введен критерий разрушения Кокрофта-Лейтема, равный 0,7.

В результате получены следующие данные: характер распределения напряжений по сечению и на поверхности заготовки, скорость и интенсивность деформации, степень накопленной информации, сила винтовой протяжки.

По данным численного эксперимента построены зависимости накопленной деформации вдоль линии тока материала (рис. 2).

Установлено влияние варьируемых параметров на степень накопленной деформации (см. таблицу).

Таким образом, увеличивая угол между входным и выходным сечением матрицы, возможно увеличить степень накопленной деформации, однако при сохранении неизменной длины винтового участка матрицы (в ходе экспериментов его изменяли от 20 до 100 мм) увеличение угла до 150° приводит к разрушению заготовки. При этом увеличение длины винтового канала снижает эффективность сдвиговых деформаций.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами физического моделирования процесса протягивания заготовки через матрицу, содержащую винтовой участок, что позволяет говорить об адекват-

Влияние параметров геометрии винтового канала на степень накопленной деформации

Номер точки	Длина винтового участка матрицы, мм				
	100			20	
	Угол между входным и выходным сечением матрицы, °				
	60	90	110	45	110
1	0,201	0,289	0,500	0,386	0,395
2	0,143	0,244	0,442	0,295	0,301
3	0,080	0,234	0,344	0,266	0,299
4	0,072	0,218	0,287	0,103	0,287
5	0,066	0,127	0,165	0,077	0,265
6	0,040	0,012	0,159	0,067	0,264
7	0,035	0,110	0,152	0,058	0,253
8	0,035	0,105	0,151	0,041	0,224
9	0,031	0,103	0,139	0,038	0,198
10	0,002	0,103	0,165	0,103	0,183
Общая степень накопленной деформации	0,07	0,15	0,25	0,14	0,32

ности разработанной модели и возможности использования для дальнейших исследований.

Данные, полученные при численном моделировании, применяют для создания аппроксимированной модели в целях проведения исследований по выбору заданных параметров инструмента для винтовой протяжки проволоки из высокоуглеродистой стали роликовым волочением либо прокаткой для получения максимальной степени накопленной деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Утяшев Ф.З.** Современные методы интенсивной пластической деформации: учеб. пос. Уфа: УГАТУ, 2008. 313 с.

2. **Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г.** Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. Донецк: ТЕАН, 2003. 87 с.

3. **Экспериментально-расчетный** метод определения деформированного состояния при винтовой экструзии / Я.Е. Бейгельзимер, А.В. Решетов, С.Г. Сынков, Д.В. Орлов, Р.Ю. Кулагин, Н.С. Кулаков // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: тематич. сб. науч. тр. Краматорск, 2005. С. 39–44.

4. **Винтовая** экструзия / Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков, Д.В. Орлов, А.В. Решетов // Кузнечно-штамповочное производство. 2004. № 6. С. 15–22.

Евгения Олеговна Некрасова,
zheka86.86@mail.ru;
Вениамин Александрович Харитонов, канд. техн. наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

СОВРЕМЕННОЕ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ

СПРАВОЧНИК **М.Ю. Сибикин**

2013 г. Объем 308 с. Формат 70x100 1/16 Обложка ISBN 978-5-94275-712-0 Цена 800 р.

В справочнике приведены сведения о назначении, области применения и технические характеристики наиболее востребованных на российском рынке моделей металлорежущего, кузнечно-прессового, литейного и сварочного оборудования отечественного и зарубежного производства.

Даны рекомендации по выбору и применению лучших моделей металлообрабатывающего оборудования при проектировании новых и реконструируемых машиностроительных предприятий. Предложены пути модернизации устаревших моделей металлообрабатывающего оборудования.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения и студентов машиностроительных вузов, техникумов и колледжей.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 08.08.2013 г. Подписано в печать 26.09.2013 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.

Поздравляем!

Николая Фомича Шпунькина,

кандидата технических наук, профессора

с 65-летием

Николай Фомич Шпунькин родился 23 октября 1948 г. в Московской области. После окончания школы в 1966 г. он поступил в Московский автомеханический институт (МАМИ), который окончил в 1971 г. по специальности "Машины и технология обработки металлов давлением". После окончания института работал в должности инженера-конструктора в КБ штампов Мытищинского машиностроительного завода. С 1975 г. работает в МАМИ, занимая должности старшего и ведущего инженера, старшего научного сотрудника на кафедре МиТОМД, и затем – ассистента, старшего преподавателя и доцента на кафедре "Начертательная геометрия и черчение". В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 1993 г. работает доцентом, а затем профессором на кафедре "Машины и технология обработки металлов давлением". С 1997 по 2011 г. являлся заведующим этой кафедры, которая стала называться "Кузовостроение и обработка давлением".

За разработку прогрессивных малоотходных технологий листовой штамповки и внедрение их в производство Н.Ф. Шпунькину в 1986 г. была присуждена премия Совета Министров СССР в области науки и техники.

Н.Ф. Шпунькиным опубликовано 110 научных трудов, включая 24 авторских свидетельства и патента на изобретения. За последние 10 лет Николай Фомич опубликовал две монографии, ряд глав в справочнике "Ковка и штамповка" (изд-во "Машиностроение", 2010 г.), восемь учебников и учебных пособий.

Н.Ф. Шпунькин является членом-корреспондентом Российской академии проблем качества, членом Ассоциации автомобильных инженеров России. Он удостоен диплома, золотой и трех бронзовых медалей ВДНХ СССР, серебряной медали Международной академии авторов научных изобретений и открытий "За заслуги в деле изобретательства", медали "В память 850-летия Москвы", награжден Почетными грамотами Минавтопрома и Министерства образования РФ, занесен в Книгу Почета Университета машиностроения.

В 2007 г. Н.Ф. Шпунькиным организована новая лаборатория "Молодежное конструкторское бюро", преобразованная в дальнейшем в лабораторию инжиниринга и прототипирования, где молодыми преподавателями, аспирантами и студентами по компьютерным моделям с использованием установок для быстрого прототипирования выполняются натурные образцы различных промышленных изделий. При участии Н.Ф. Шпунькина в 2005 и 2008 гг. в Учебно-научно-техническом центре МАМИ в г. Ивантеевка были открыты две лаборатории обработки металлов давлением.

Коллектив Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), редакция и редакционный совет журнала "Заготовительные производства в машиностроении" желают Николаю Фомичу здоровья, благополучия и новых профессиональных достижений!