ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 2 февраль 2015

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

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

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И., к.т.н.
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
БОГАТОВ А.А., д.т.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОТЕНОК В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., 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.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
СУБИЧ В.Н., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШЕСТАКОВ Н.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯКОВЛЕВ С.С., д.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ТУТМАН Т., Dr.Yur.
ЭРКСЛЕБЕН С., Dr.-Ing.

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Серебряков С.П., Редькин И.А., Матвеев А.С. Совершенствование процесса сушки литейных оболочковых форм 3
Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Технологические предпосылки повышения эффективности литья по выплавляемым моделям 8
Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Гизатулин Р.А., Осетковский И.В. Влияние легирования наплавленного хромовольфрамового металла на формирование временных напряжений 12

Кузнечно-штамповочное производство

Семеноженков В.С., Семеноженков М.В. Взаимосвязь точности позиционирования стола револьверной подачи и ее работоспособности 16
Анцифиров А.А., Кривошеин В.А. Кинематические параметры штамповки на гидроколенных прессах с небольшой длительностью процесса деформирования 19
Вдовин С.И., Татарченков Н.В., Лунин К.С. Позиционирование дорна при гибке труб 26

Прокатно-волочильное производство

Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М., Егоров В.Д. К разработке прогрессивного производства проволоки и канатов в северном исполнении 29

Материаловедение и новые материалы

Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств 35

Информация

Гребнев Ю.В., Жаркова В.Ф. Исследование композиционного металлического материала XIX в. 42
Алпеева Е.В., Родионова И.Н., Котельников А.А. Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчета сварных конструкций методом конечных элементов 45

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

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

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

© Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2015

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and other productions)

№ 2 February 2015

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossi2 **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

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

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Serebryakov S.P., Red'kin I.A., Matveev A.S. Improvement of drying process of casting shell moulds 3
Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Technological preconditions of increase of investment casting efficiency 8
Malushin N.N., Osetkovsky V.L., Gizatulin R.A., Osetkovsky I.V. Effect of alloying of deposited chromium-tungsten metal on formation of temporary stresses. 12

Forging and Stamping Production

Semenozhenkov V.S., Semenozhenkov M.V. Relationship of positioning accuracy of dial feed table and its serviceability. 16
Antsyfirov A.A., Krivoshein V.A. Kinematic parameters of stamping on knuckle joint presses with hydro drive for short period of deformation process 19
Vdovin S.I., Tatarchenkov N.V., Lunin K.S. Positioning of drift-pin due to bending of tubes 26

Rolling and Drawing Production

Gur'yanov G.N., Zuev B.M., Egorov V.D. To development of progressive production of wire and ropes in north version 29

Physical Metallurgy and New Materials

Sokolov Yu.A., Kondrat'ev S.Yu., Luk'yanov A.A. Production of products from composite materials by electronic beam synthesis method and research of their properties 35

Information

Grebnev Yu.V., Zharkova V.F. Study of composite metal material of XIX century 42
Alpeeva E.V., Rodionova I.N., Kotel'nikov A.A. Application of functional and cost analysis for determination of efficiency of programs for calculation of welded constructions by finite element method 45

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

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

© «Mashinostroenie Publishers», «Blanking productions in mechanical engineering», 2015

УДК 669.01

С.П. Серебряков, И.А. Редькин*, А.С. Матвеев
*(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева, *ОАО "НПО "Сатурн", г. Рыбинск)*

Совершенствование процесса сушки литейных оболочковых форм

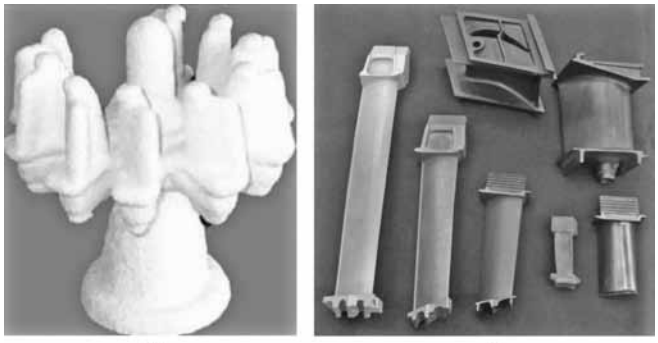
Описан новый метод сушки литейных оболочковых форм, позволяющий повысить равномерность нанесения керамических слоев и их прочность. Разработана физическая модель процесса, позволяющая оценить параметры напряженного состояния керамического слоя в процессе его нанесения и сушки.

Ключевые слова: керамическая оболочковая форма; литье по выплавляемым моделям; нанесение оболочки; кипящий слой; сушка оболочки; прочность оболочки; дефекты оболочки; давление воздуха при сушке.

New method for drying of casting shell moulds, which allows to increase the uniformity of application of ceramic layers and their strength. Physical model of the process that allows to estimate the parameters of the stress state of the ceramic layer in the process of application and drying is developed.

Keywords: ceramic shell mould; investment casting; shell application; fluidized bed; shell drying; shell strength; shell defects; air pressure drying.

Керамические оболочковые формы в процессах литья по выплавляемым моделям широко распространены в различных отраслях промышленности, в том числе и авиационном двигателестроении (рис. 1).

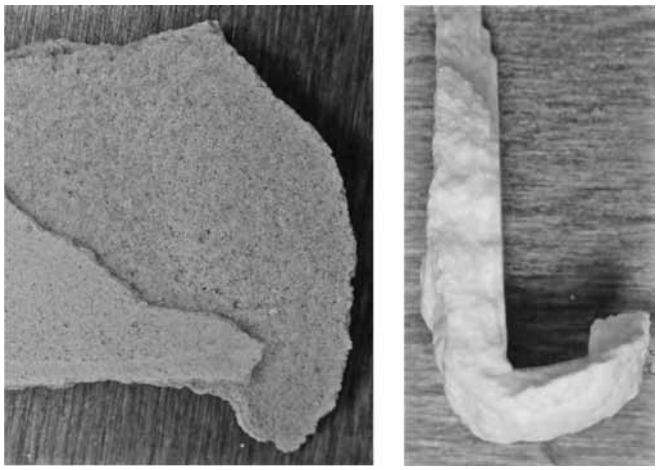


а) *б)*

Рис. 1. Керамическая оболочковая форма блока отливок "лопатка ГТД" (*а*) и отливки "лопатка ГТД" (*б*)

Нарушение оптимальных режимов сушки литейных оболочковых форм нередко приводит к таким характерным дефектам, как отслоение керамических слоев от модели (рис. 2, *а*) и их натекание друг на друга (рис. 2, *б*).

Отслоение может быть объяснено градиентом скорости образования прочных структур по толщине слоя. При этом фронт образования прочных структур движется от поверхности омываемой потоком сушильного агента вглубь слоя, что приводит к возникновению градиента влагосодержания по толщине формируемого слоя *керамической оболочковой формы* (КОФ). Возникающие при сушке КОФ неравномерные по толщине и высоте усадочные напряжения в формируемом керамическом слое могут привести к дефекту форм по отслоению. Разная толщина оболочки по высоте блока вследствие натекания от действия гравитационных сил также способствует неравномерной сушке и формиро-



а) *б)*

Рис. 2. Дефекты керамических оболочковых форм:
а — отслоение; *б* — натекание слоев друг на друга

ванию изменяющихся по высоте блока толщины стенки оболочковой формы, приводящих к неравномерности технологических и прочностных свойств изготовляемой формы.

Увеличение скорости сушки за счет изменения физических параметров сушильного агента, в качестве которого традиционно используется воздух (изменение температуры, влажности воздуха), а также повышение скорости потока сушильного агента имеет ограничения, диктуемые типом связующего формируемых слоев формы [1].

Для предотвращения указанных дефектов изготовляемых оболочковых форм предложен и успешно апробирован усовершенствованный способ изготовления высокопрочных оболочковых форм для процессов литья по выплавляемым моделям — PV-процесс [2—4].

Сущность способа заключается в том, что после нанесения слоя суспензии на поверхность блока и присыпки в псевдоожиженном слое зернистого огнеупора блок остается погруженным в слое теперь уже осевшего огнеупора. После герметизации рабочей камеры установки происходит движение потока сушильного агента через слой зернистого огнеупора сверху вниз. Таким образом, реализуются операции нанесения и сушки слоев КОФ.

Применение зернистого огнеупора в разработанном способе сушки позволяет увеличить скорость движения сушильного агента со снижением риска нарушения целостности формируемого слоя. При повышенных скоростях (5...10 м/с) движения сушильного агента в условиях обычной конвективной сушки наблюдается сдувание песчинок и пленки связующего с поверхности модели. В разработанном способе сушки зерна огнеупора находятся в состоянии плотной упаковки, и фильтрация сушильного агента с линейными скоростями 5...10 м/с не приводит к нарушению слоя. Способ позволяет компенсировать возникающие в процессе сушки усадочные напряжения, тем самым снизить вероятность получения дефекта форм по отслоению.

Роль опорного каркаса при сушке по PV-процессу [2—4] выполняет зернистый огнеупор. Фильтрация сушильного агента через огнеупор приводит к возникновению напряжений сжатия в слое огнеупора. Возникающие при этом силы давления на зерна огнеупора, превышающие поверхностное натяжение суспензии, обеспечивают формирование плотного и однородного по технологическим характеристикам слоя оболочки. Равномерное распределение у поверхности слоя зерен опорного наполнителя препятствует стеканию

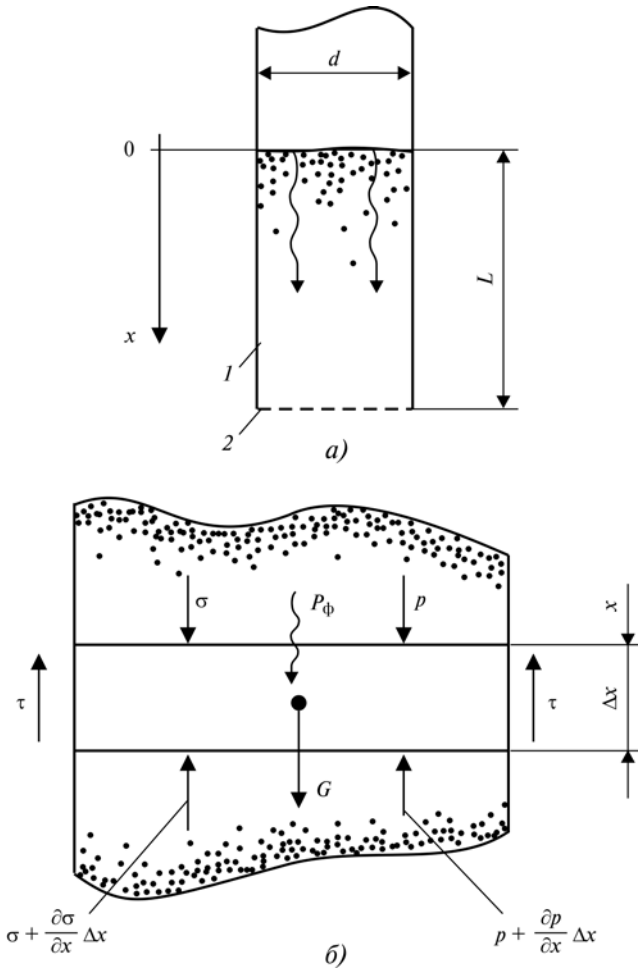


Рис. 3. Расчетная схема:
а — общая схема процесса фильтрации; *б* — элементарный слой зернистого огнеупора; *1* — рабочая камера; *2* — фильтр; *d* — диаметр сушильной камеры; *L* — длина сушильной камеры; волнистые стрелки — обозначение фильтрующегося сушильного агента (воздуха)

суспензии, что также положительно сказывается на свойствах получаемых КОФ.

Для определения уровня указанных напряжений была решена задача о величине давления зернистого материала на стенку сосуда при фильтрации через него сушильного агента (рис. 3, *а*).

Рассмотрим равновесие элемента опорного наполнителя в рабочей камере установки (рис. 3, *б*).

Составляющие сил для дисперсной и сплошной фаз имеют вид:

1. Силы веса:

$$\Delta x \varepsilon_2 \rho_2 g F \quad \text{и} \quad \Delta x \varepsilon_1 \rho_1 g F, \tag{1}$$

где Δx — толщина элементарного слоя зернистого огнеупора;

F — площадь поперечного сечения рабочей камеры;

ε_1, ε_2— пористость зернистого огнеупора и сушильного агента соответственно;

ρ_1, ρ_2 — плотность зернистого огнеупора и сушильного агента соответственно;

g — ускорение свободного падения.

2. Силы инерции:

$$\Delta x \varepsilon_2 \rho_2 \frac{d\nu_2}{dt} \quad \text{и} \quad \Delta x \varepsilon_1 \rho_1 \frac{d\nu_1}{dt}, \tag{2}$$

где v — кинематическая вязкость;

t — время.

3. Силы межфазного сопротивления:

$$\Delta x \varepsilon_2 S f \quad \text{и} \quad -\Delta x \varepsilon_1 S f, \tag{3}$$

где S — площадь сечения формы;

$f = \mathrm{tg}\varphi$ — коэффициент внешнего трения покоя;

φ — угол внутреннего трения.

4. Силы от нормальных напряжений на зернистую среду:

$$\sigma_x F - \left(\sigma_x + \frac{d\sigma_x}{dx}\Delta x\right) F. \tag{4}$$

5. Силы от касательных напряжений на стенках сосуда:

$$-\sigma_\tau \Pi = -\sigma_y \mathrm{tg}\varphi_в \Pi, \tag{5}$$

где Π — периметр рабочей камеры;

σ_y — нормальное напряжение;

σ_τ — касательное напряжение;

$\varphi_в$ — угол внешнего трения.

6. Силы от разности давлений в сплошной фазе:

$$p\varepsilon_2 F - \left(p + \frac{dp}{dx}\Delta x\right)\varepsilon_2 F \quad \text{и} \quad p\varepsilon_1 F - \left(p + \frac{dp}{dx}\Delta x\right)\varepsilon_1 F, \tag{6}$$

где p — давление сушильного агента.

Запишем уравнение равновесия сил для каждой фазы:

$$\varepsilon_1 \rho_1 \frac{d\nu_1}{dt} = \varepsilon_1 \rho_1 g - f \varepsilon_2 S - \varepsilon_1 \frac{dp}{dx}; \tag{7}$$

$$\varepsilon_2 \rho_2 \frac{d\nu_2}{dt} = \varepsilon_2 \rho_2 g + f \varepsilon_2 S - \\ - \varepsilon_2 \frac{dp}{dx} - \frac{d\sigma_x}{dx} - \sigma_\tau \mathrm{tg}\varphi_в \frac{\Pi}{F}. \tag{8}$$

Давление опорного наполнителя на вертикальные образующие рабочей камеры при условии активного состояния зернистого огнеупора по отношению к фильтрационным силам может быть найдено из уравнения:

$$\sigma_y = \sigma_x \xi, \tag{9}$$

где $\xi = \frac{(1-\sin\varphi)}{(1+\sin\varphi)}$ — коэффициент бокового давления.

Уравнения (7)—(9) определяют течение фильтрационного процесса согласно рис. 3, *б*. Для первых слагаемых в (7) и для последнего в (8) знак определяется направлением оси x и ориентацией касательных напряжений на стенках. Подобные упрощения позволяют избежать численных методов решения.

Для реализации процесса сушки необходимо обеспечить движение потока сушильного агента с заданной скоростью фильтрации в слое зернистого огнеупора $w_ф$. Для этого необходим градиент давлений сушильного агента. В первом приближении скорость фильтрации должна быть не меньше скорости движения воздуха в камерных сушилах, т.е. $w_ф \geqslant 0{,}3$ м/с.

Необходимый расход сушильного агента:

$$Q_ф = w_ф \varepsilon_1 \frac{\pi D^2}{4}, \tag{10}$$

где D — внутренний диаметр рабочей полости установки, м.

Необходимое давление над поверхностью зернистого огнеупора:

$$P_ф = \left(\frac{2 w_ф \varepsilon_1 P_{ф.суш} H}{a} + P_{ф.суш}^2\right)^{0,5}, \tag{11}$$

где H — высота слоя опорного наполнителя, м;

$P_{ф.суш}$ — гидравлическое сопротивление зернистого огнеупора, Па:

$$P_{\text{ф.суш}} = \xi_p \rho_2 \frac{w_{\text{ф}}^2}{2g}, \quad (12)$$

где ξ_p — коэффициент гидравлического сопротивления фильтра;

a — константа фильтрации, м^2/(Па·с):

$$a = \frac{\varepsilon_1^3}{2\zeta^2 S^2 (1-\varepsilon)^2 \mu}, \quad (13)$$

где ζ — коэффициент извилистости;

S — удельная поверхность частиц опорного наполнителя, м$^{-1}$;

μ — динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Примем, что габаритные размеры зерен зернистого огнеупора равны, тогда коэффициент извилистости для изометрических частиц определим из уравнения:

$$\zeta = \varepsilon_1 + 0{,}25(1 - \varepsilon_1)(\pi + 4). \quad (14)$$

Удельная поверхность частиц:

$$S = \frac{6}{\delta}, \quad (15)$$

где δ — средний диаметр зерен опорного наполнителя, м.

Формирование плотной структуры слоя КОФ происходит при условии внедрения зерен присыпки в слой суспензии, т.е. на глубине погружения блока в зернистый огнеупор должно выполняться условие:

$$\sigma_y \frac{\pi\delta^2}{4} \geqslant \sigma_C \pi\delta, \qquad \sigma_y \geqslant \frac{\sigma_C \cdot 4}{\delta}, \quad (16)$$

где σ_C — поверхностное натяжение суспензии, Н/м.

С учетом активного состояния слоя зернистого огнеупора:

$$\sigma_x \geqslant \frac{\sigma_C \cdot 4}{\delta\xi}. \quad (17)$$

Для оценки уровня напряжений проведем расчет распределения напряжений по высоте опорного наполнителя.

Исходные данные: $w_{\text{ф}}$ = 0,4 м/с; D = 0,104 м; коэффициент гидравлического сопротивления фильтра ξ_p = 20000; высота слоя зернистого огнеупора H = 0,15 м; угол внутреннего трения опорного наполнителя φ = 35°; угол внешнего трения зернистого огнеупора $\varphi_{\text{в}}$ = 30°; σ = 45 мН/м; δ = 0,00011 м; ρ_1 = 2200 кг/м^3; ρ_2 = 1,293 кг/м^3; ε_1 = 0,54.

Из уравнений (7) и (8) получаем:

$$0 = \varepsilon_1 \rho_1 g - f \varepsilon_2 S - \varepsilon_1 \frac{dp}{dx}; \quad (18)$$

$$0 = \varepsilon_2 \rho_2 g + f \varepsilon_2 S - \varepsilon_2 \frac{dp}{dx} - \frac{d\sigma_x}{dx} - \sigma_\tau \operatorname{tg}\varphi_{\text{в}} \frac{\Pi}{F}. \quad (19)$$

Принимая состояние зернистого огнеупора активным по отношению к фильтрационным силам имеем:

$$0 = \varepsilon_2 \rho_2 g + f \varepsilon_2 S - \varepsilon_2 \frac{dp}{dx} - \frac{d\sigma_x}{dx} - \sigma_x B, \quad (20)$$

где $B = \xi \operatorname{tg}\varphi_{\text{в}} \dfrac{\Pi}{F}$.

Из (18) и (20) следует:

$$0 = g\left(\varepsilon_2 \rho_2 + \varepsilon_1 \rho_1\right) - \frac{dp}{dx} - \frac{d\sigma_x}{dx} - \sigma_x B. \quad (21)$$

Интегрируем (21) с учетом, что $g\left(\varepsilon_2 \rho_2 + \varepsilon_1 \rho_1\right) - \dfrac{dp}{dx} = \text{const}$:

$$\int_0^{\sigma_x} \frac{d\sigma}{g\left(\varepsilon_2 \rho_2 + \varepsilon_1 \rho_1\right) - \dfrac{dp}{dx} - B\sigma} = \int_0^x dy, \quad (22)$$

и получаем

$$\sigma_x = \frac{\left(g\left(\varepsilon_2 \rho_2 + \varepsilon_1 \rho_1\right) - \dfrac{dp}{dx}\right)\left(1 - \exp\left(-Bx\right)\right)}{B}. \quad (23)$$

Определив константы в (23):

$$g(\varepsilon_2 \rho_2 + \varepsilon_1 \rho_1) = 9934{,}6 \text{ кг/(с}^2 \cdot \text{м}^2);$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{H} = -58150{,}3 \text{ Па/м},$$

где $P_1 = P_{\text{ф}}$ = 27356,7 Па; $P_2 = P_{\text{ф.суш}}$ = 18634,2 Па определены по формулам (11)—(15);

$$B = 6{,}018 \text{ м}^{-1},$$

получим

$$\sigma_x = 11314{,}4(1 - \exp(-6{,}018x)). \quad (24)$$

Глубина слоя зернистого огнеупора, на которой начнет выполняться условие формирования плотной упаковки зерен, определена из формулы (24) по выражению:

$$x_{\text{кр}} = \frac{\ln\left(1 - \dfrac{\dfrac{\sigma_C \cdot 4}{\delta\xi} B}{\left(g\left(\varepsilon_2\rho_2 + \varepsilon_1\rho_1\right) - \dfrac{dp}{dx}\right)}\right)}{-B} = 0{,}0003 \text{ м}. \qquad (25)$$

Распределение напряжения σ_y по высоте зернистого огнеупора и давления фильтрующегося сушильного агента, рассчитанное по формуле (11), представлено на рис. 4.

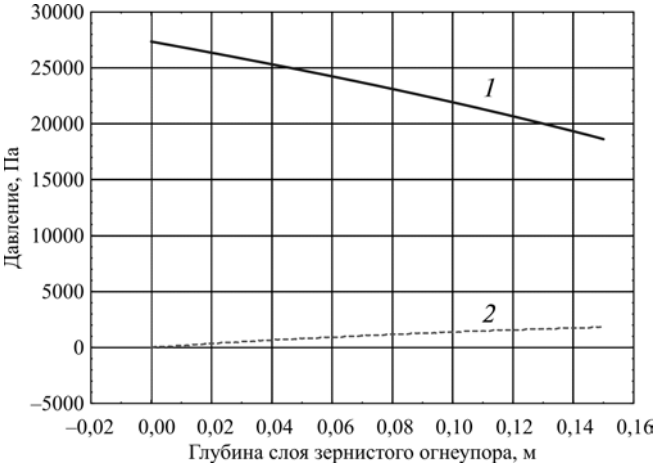


Рис. 4. Распределение давлений в слое зернистого огнеупора: *1* — $P_ф$; *2* — σ_y

Диапазон рабочих давлений промышленных установок (до 0,8 МПа) позволяет пренебречь изменением пористости слоя огнеупорного наполнителя под действием давления над свободной поверхностью слоя при организации направленного потока сушильного агента. Таким образом, ограничения по величине рабочих давлений накладывают свойства применяемых модельных масс. Среди стандартных технологических характеристик модельных масс отсутствует параметр твердости, однако существует понятие сопротивляемости внедрению "пенетрация" (ГОСТ 25771—83). Экспериментально была установлена возможность применения модельных масс, обладающими показателями пенетрации 9...12 мм$^{-1}$, в диапазоне рабочих давлений PV-процесса от 0 до 0,6 МПа.

Таким образом, сушка керамических оболочковых форм PV-процессом позволяет получать уплотненные слои огнеупорного покрытия без приложения значительных градиентов давлений и глубокого погружения блока в слой зернистого огнеупора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Емельянов В.О.** Формирование структуры и свойств керамических форм. СПб.: ПИМаш, 2007. 60 с.

2. **Редькин И.А., Серебряков С.П.** Формирование оболочковых форм в сжатом состоянии (PV-процесс) // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 10. С. 6—8.

3. **Пат. 2359777 РФ, МПК B22C9/04.** Способ изготовления керамических оболочковых форм / С.П. Серебряков, И.А. Редькин. 27.06.2009.

4. **Редькин И.А., Серебряков С.П., Облакова О.А.** Анализ и совершенствование процесса сушки керамических оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям // Материалы Российской научно-технической конференции "Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве". Т. 1. Рыбинск: РГАТА, 2007. С. 165—167.

Сергей Павлович Серебряков, д-р техн. наук,
serebryakov_sp@mail.ru;
Иван Александрович Редькин, канд. техн. наук;
Анатолий Сергеевич Матвеев, д-р техн. наук

Читайте в следующем номере

❖ **Кидалов Н.А., Осипова Н.А., Князева А.С.** Технология изготовления формовочных смесей на основе водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента

❖ **Овчинников В.В., Новиков В.А., Малов Д.А.** Сравнительные испытания заклепочных соединений алюминиевых сплавов, полученных различными методами клепки

УДК 621.74.04

И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров *(Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре)*

Технологические предпосылки повышения эффективности литья по выплавляемым моделям*

Представлены некоторые варианты повышения эффективности литья по выплавляемым моделям при сохранении размерно-геометрической точности и качества получаемого литья. Использование предлагаемых разработок в промышленных условиях позволит сократить затраты на производство отливок и, как следствие, их себестоимость за счет недорогих расходных и шихтовых материалов, сокращения технологического цикла изготовления металлоизделий.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям; оболочковая форма; размерно-геометрическая точность; отходы металлургических и машиностроительных предприятий; термитная реакция.

The some options for increasing the efficiency of investment casting while retaining the dimensional and geometric accuracy and the quality of the casting are presented. The using of proposed development under industrial conditions would reduce cost of casting production and their production cost through cheapest consumables and burden materials, reduce of process cycle of production of metal products, as a result.

Keywords: investment casting; shell mold; dimensionally and geometrical accuracy; waste of metallurgical and machine-building enterprises; termite reaction.

Преимуществами метода литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) являются: возможность изготовления тонкостенных отливок сложной конфигурации из труднообрабатываемых сплавов; широкий диапазон получаемых отливок по конфигурации исполнения и по массе (от нескольких граммов до десятков килограммов) с параметром шероховатости поверхности до $Ra = 1{,}25$ мкм и высокой размерно-геометрической точностью [1, 2]; возможность получения отливок в ряде случаев, не требующих механической обработки.

Однако ЛВМ свойственны недостатки, сдерживающие широкое распространение в России и за рубежом, такие как: многооперационность, длительность технологического процесса с использованием значительного количества дорогостоящих расходных материалов, неоправданно высокое количество брака моделей, оболочковых форм (ОФ) и отливок в процессе производства. В совокупности, изложенное выше, приводит к образованию высокой себестоимости литья.

Изучение и совершенствование процесса получения ОФ и отливок, а именно: разработка технологических методов сокращения производственного цикла и брака при производстве, использование более доступных и дешевых материалов направлены на популяризацию ЛВМ и его широкое распространение. Поиск вариантов усовершенствования технологий ЛВМ представляется актуальным.

В статье представлены некоторые варианты повышения эффективности ЛВМ при сохранении размерно-геометрической точности и качества получаемого литья.

Традиционно ОФ изготовляют путем последовательного нанесения огнеупорной суспензии на модель отливки, получаемой из воскообразного материала, например ПС 50/50 [1]. Формирование слоев происходит поочередно, каждый следующий слой наносится на высушенный предыдущий. После образования необходимого количества слоев модель выплавляют. ОФ подвергают прокалке при температуре 900...950 °С для удаления остатков модельного состава и прохождения полиморфных превращений в ее структуре. Далее проводят заливку формы металлом. Однако ОФ имеет низкую прочность и при технологических воздействиях статической и динамической нагрузок может разрушиться, так как является жесткой конструкцией и возникающие напряжения распределяются по всему ее объему. Эти обстоятельства инициируют высокий расход дорогостоящей огнеупорной суспензии и повышают себестоимость литья.

Основной целью исследований является получение ОФ в ускоренном режиме из доступных недорогих материалов с повышенной трещиностойкостью и прочностью. Разработанные в ходе исследований технологические рекомендации на-

* Работа выполнена при поддержке научно-технического проекта Президиума ДВО РАН № 13-НТП I-06 "Разработка технологии получения огнеупорной керамической оболочки с высокой термомеханической стойкостью".

правлены, главным образом, на снижение себестоимости отливок, получаемых в ЛВМ.

Для реализации поставленной цели предложено литниково-питающую систему (ЛПС) ОФ изготовлять из типовых конусных керамических элементов с закрепленными в прорезях боковых поверхностей оболочек или моделей деталей с питателями (рис. 1).

Конусные типовые керамические элементы (рис. 1, *а*, *б*) выполнены из более дешевых огнеупорных материалов: песка, шамота и др. Оболочки отливок с питателями, закрепленные в прорезях боковых поверхностей типовых элементов, изготовлены из традиционной этилсиликатной суспензии (см. рис. 1, *в*).

Такой вариант изготовления ОФ направлен на уменьшение расхода модельного состава и огнеупорной суспензии, снижение материальных затрат и вредных выбросов в атмосферу, сокращение производственного цикла изготовления формы и увеличение прочности всей ЛПС при сокращении брака оболочек.

Изготовление ОФ осуществляется следующим образом. Из огнеупорного материала изготовляют полые типовые керамические элементы ОФ (см. рис. 1, *а*, *б*). Керамические оболочки отливок *5* с питателями формируют на модели отливок из воскообразного материала последовательным нанесением и сушкой слоев традиционной огнеупорной суспензии. После высыхания слоев огнеупорной суспензии модель выплавляют нагревом воскообразной массы до температуры ее плавления.

В дне зумпфа *1* при формовании выполняют отверстие с резьбой, в которое вкручивают длинный металлический стержень *3* с прижимным диском для жесткой фиксации конструкции и предотвращения попадания опорного наполнителя в полость формы. Кроме того, в каждом типовом элементе делают несколько прорезей *4* определенной конфигурации для закрепления в них оболочек отливок *5*. Конфигурация прорезей *4* определяется конфигурацией питателей оболочковых форм отливок *5*.

Сборку ОФ ведут следующим образом. Металлический стержень *3* с прижимной шайбой устанавливают вертикально (резьбой вверх) на сборочном столе. На стержень нанизывают большим основанием книзу полые типовые элементы формы *2* в требуемом количестве, которые составляют конструкцию стояка ОФ. Затем в прорези боковых поверхностей *4* типовых оболочковых элементов *2* вставляют изготовленные керамические оболочковые формы отливок *5* с питателями.

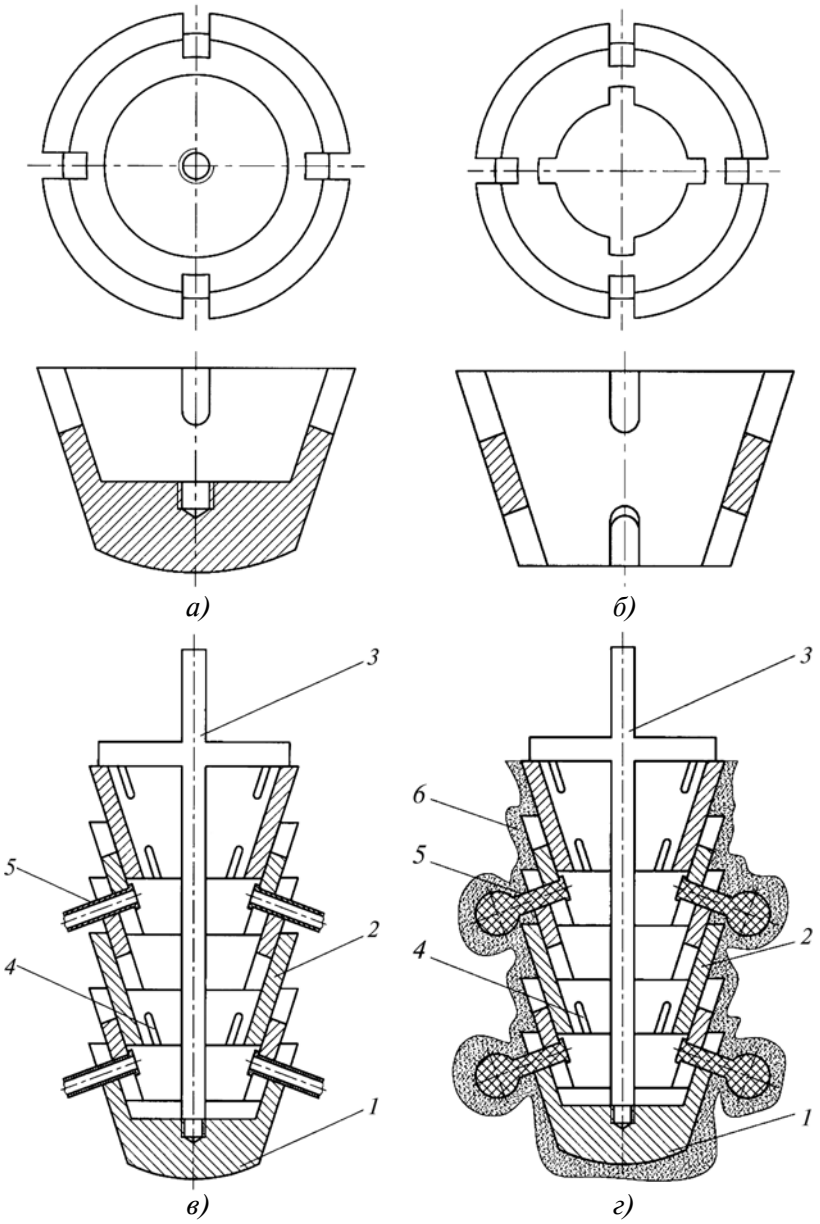


Рис. 1. Типовые элементы и конструкции различных вариантов исполнения оболочковых форм:

а — зумпф; *б* — типовой элемент стояка; *в* — ОФ из типовых элементов в сборе для заливки в опорный наполнитель; *г* — ОФ из типовых элементов в сборе для заливки без опорного наполнителя

После установки всех типовых элементов и оболочек отливок *5* на резьбовую часть металлического стержня навинчивают зумпф *1* с глухим резьбовым отверстием и затягивают для жесткой фиксации всех элементов конструкции ОФ. Полученную конструкцию располагают в опоке и засыпают песком, подвергают вибрационному уплотнению для жесткой фиксации всех элементов конструкции ОФ. Металлический стержень *3* с прижимным диском выкручивают и форму подают на прокалку и заливку.

Альтернативным вариантом получения отливок в ОФ без опорного наполнителя при обеспечении требуемой стойкости к образованию трещин ОФ является способ, отличающийся от изложенного выше тем, что в прорезях боковых поверхностей типовых элементов устанавливают не оболочки отливок, а их модели с питателями. При этом после сборки на полученную конструкцию последовательно наносят и сушат 2...5 слоев традиционной огнеупорной этилсиликатной суспензии (см. рис. 1, *г*). После сушки слоев *6* огнеупорного покрытия ОФ модели удаляют выплавлением или выжиганием. Операцию выплавления моделей из ОФ можно совместить с прокаливанием последних. После удаления моделей ОФ прокаливают при температуре 900...950 °С и заливают расплавом металла.

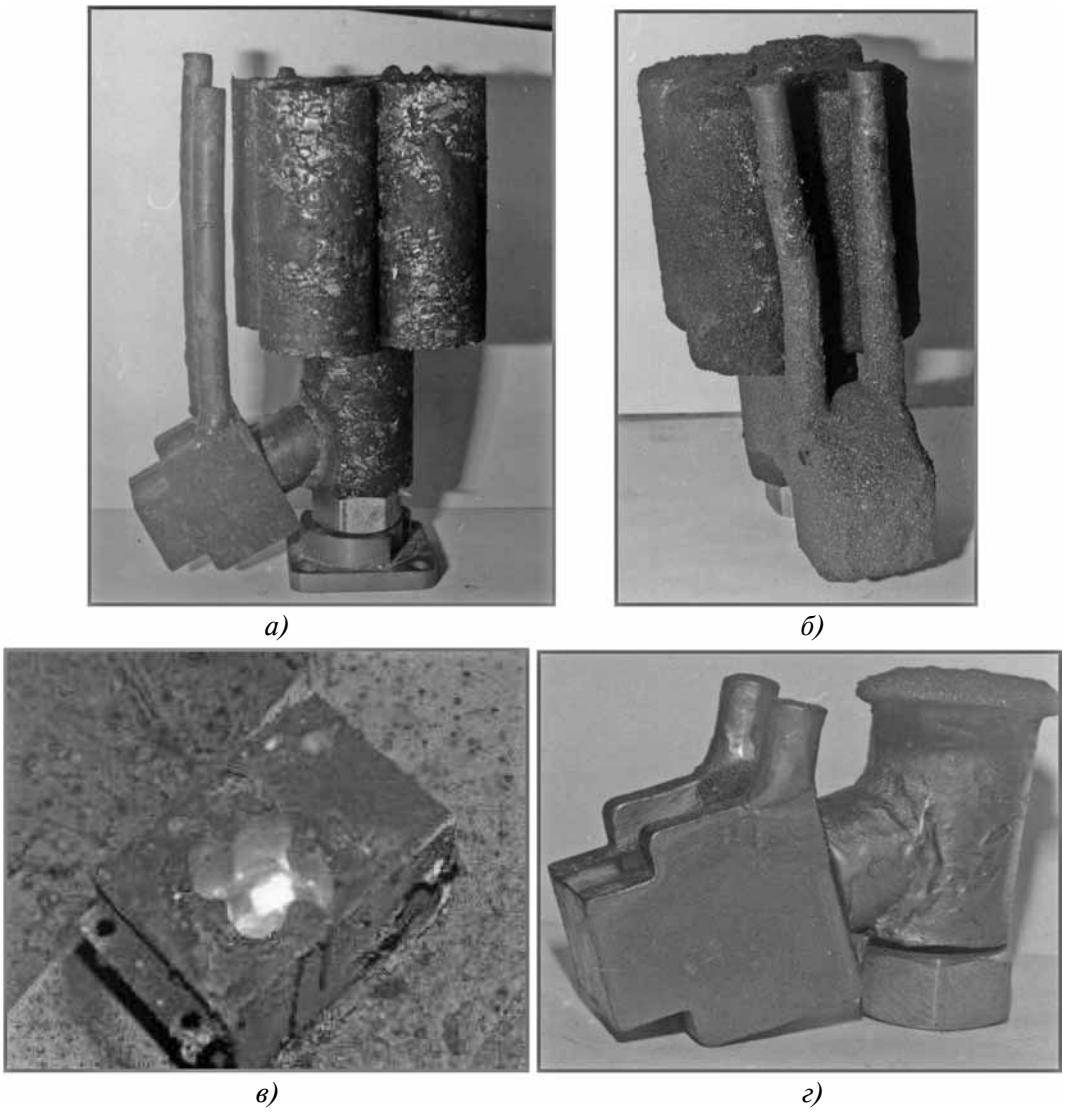


Рис. 2. Технология получения отливки из металлотермитной шихты:

а — модельный металлотермитный блок; *б* — неразъемная графитовая оболочка, формируемая на модельном металлотермитном блоке; *в* — оболочковая форма в опорном наполнителе с расплавом металла; *г* — отливка с элементами литниково-питающей системы

Применение рассмотренных технологических вариантов изготовления отливок позволяет получать керамические ОФ повышенной прочности, не требующих заформовки в опорный наполнитель. Это ведет к сокращению технологического цикла изготовления отливок за счет ликвидации операции выплавления моделей, уменьшения времени прокаливания ОФ и снижению их себестоимости.

Сокращение себестоимости отливок в ЛВМ может быть достигнуто использованием отходов металлургических и машиностроительных предприятий (ОММП), таких как: окалина, стружка черных и цветных металлов. В основу такого технологического процесса положена экзотермическая окислительно-восстановительная реакция, в ходе которой происходит восстановление железа из ОММП с получением расплава [3—5]. Исходной шихтой для получения стали служит смесь, представляющая собой композицию дисперсного алюминия, окалины и наполнителей. В качестве наполнителей применяют стружку черных металлов, различные лигатуры и модификаторы для доведения стали по химическому составу, соответствующему требуемой марке.

В данном случае [6] прессованием металлотермической шихты, состоящей из железоалюминиевого термита, ферросплавов и воскообразного модельного материала изготовляют модельный блок с литниково-питающей системой (рис. 2).

На модельный блок наносят слои суспензии из термореактивного раствора и огнеупорного материала — графита, формируя оболочковую форму. Слои суспензии для их упрочнения обсыпают графитом и сушат. Число наносимых слоев различно: от 3—4 до 20 и более, в зависимости от металлоемкости и назначения стальных отливок. В целях защиты графитовой оболочковой формы от термосиловых воздействий ее помещают в опоку, заформовывают в сыпучий или содержащий связующее опорный наполнитель, прокаливают при температуре 1000...1200 °С для термодеструкции связующего и удаления органических остатков модельных материалов.

Ранее установлено [6], что на интенсивность экзотермической реакции и качество получаемого металла отливки влияет технологически необходимая для рассматриваемого способа температура подогрева модельного блока из термитной шихты (более 900 °С).

В разогретой ОФ, находящейся в опоке, осуществляют воспламенение термитного материала, например, газопламенной горелкой или смесью — активатором реакции. Процесс горения протекает последовательно, распространяясь на весь объем термитного материала. Шлак, образующийся при прохождении термитной реакции, всплывает в верхнюю часть ОФ. В форме образуется расплав стали, который затем затвердевает, формируя стальную отливку. Стальная отливка охлаждается и извлекается из ОФ традиционным способом.

Данная технология реализуется посредством использования традиционной оснастки и доступных материалов, позволяет сократить производственный цикл получения отливок в 1,5—2 раза, что обеспечивает его промышленную применимость.

Технологические варианты усовершенствования процесса получения отливок, основанного на использовании метода ЛВМ, и использование предлагаемых разработок в промышленных условиях представляется экономически предпочтительным, так как позволит сократить затраты на производство отливок и, как следствие, их себестоимость за счет использования недорогих расходных и шихтовых материалов, сокращения технологического цикла изготовления металлоизделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Литье** по выплавляемым моделям / В.Ф. Гаранин, В.Н. Иванов, С.А. Казеннов и др.; под общ. ред. В.А. Озерова. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1994. 448 с.

2. **Сапченко И.Г., Жилин С.Г.** Деформационные процессы в формируемых слоях оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2011. № 4. С. 34—37.

3. **Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н.** Об эффективности прибылей с высоким температурным градиентом для стальных отливок // Литейное производство. 2006. № 7. С. 9—12.

4. **Применение** термитных прибылей при получении стальных отливок / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, В.В. Предеин // Литейное производство. 2009. № 6. С. 33—36.

5. **Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н.** Способ получения стальных отливок: пат. РФ на изобретение № 2367539, опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.

6. **Термохимические** процессы получения отливок из термитной шихты в графитовых оболочковых формах / О.Н. Комаров, И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, В.В. Предеин // Металлургия машиностроения. 2013. № 6. С. 33—37.

Игорь Георгиевич Сапченко, д-р техн. наук;
Сергей Геннадьевич Жилин, канд. техн. наук,
zhilin@imim.ru;
Олег Николаевич Комаров, канд. техн. наук

УДК 621.791.92

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

Влияние легирования наплавленного хромовольфрамового металла на формирование временных напряжений

Исследовано влияние дополнительного легирования наплавленного хромовольфрамового металла никелем, кобальтом и алюминием на формирование временных напряжений и стойкость против образования холодных трещин. Рекомендован оптимальный состав наплавленного металла, обеспечивающий высокие твердость и стойкость против образования холодных трещин.

Ключевые слова: наплавка; легирование; теплостойкие стали; низкотемпературный подогрев; регулируемый термический цикл; временные напряжения.

The influence of additional alloying of deposited chromium-tungsten metal by nickel, cobalt and aluminum on the formation of temporary stresses and resistance to cold cracking is studied. The optimal composition of the deposited metal provides high hardness and resistance to cold cracking is recommended.

Keywords: welding; alloying; heat-resistant steels; low temperature heating; adjustable thermal cycle; temporary stresses.

Стойкость металла против образования холодных трещин можно изменять, регулируя нарастание в нем при охлаждении временных сварочных напряжений. Наиболее простой и надежный способ такого регулирования состоит в выборе химического состава наплавленного металла, которым определяются коэффициент линейного расширения, характер и объемный эффект структурных превращений. Эти факторы оказывают существенное влияние на развитие временных напряжений в процессе наплавки.

При исследовании эффекта кинетической пластичности стали Р18 было также отмечено, что степень легирования оказывает известное влияние на релаксацию временных напряжений. Высказывалось предположение о возможности регулирования остаточных напряжений путем смещения кривой формирования временных напряжений в область более низких температур за счет соответствующего легирования наплавленного металла. Тогда временные напряжения, накопившиеся при охлаждении металла в аустенитной области, в основном релаксируются в интервале мартенситного превращения и не получают дальнейшего развития при охлаждении до комнатной температуры вследствие малой величины интервала $M_к^{усл} - T_к$ [1].

Целью работы является изыскание путей уменьшения остаточных напряжений, а следовательно, и снижения вероятности образования холодных трещин в хромовольфрамовом наплавленном металле путем его дополнительного легирования. Эксперименты проводили на образцах из наплавленного металла типа 3Х2В8, дополнительно легированного углеродом, хромом, вольфрамом, никелем, алюминием соответствующим изменением химического состава порошковой проволоки [1].

На рис. 1 представлены данные об изменении временных термических напряжений в жестко закрепленных образцах из наплавленного металла, состав которого представлен в таблице.

Химический состав исследованных сталей, % мас.

Наплавленный металл	C	Si	Mn	Cr	W	Al
3Х2В8	0,35	0,8	0,9	2,5	8,5	—
4Х4В10Ю	0,42	0,8	0,9	3,78	9,2	0,44
Р18Ю	0,82	0,25	0,21	4,1	18	0,68

Температура нагрева образцов $T_н$ = 1200 °С. Из рис. 1 видно, что в интервале мартенситного превращения временные напряжения уменьшаются примерно в 2 раза по сравнению с напря-

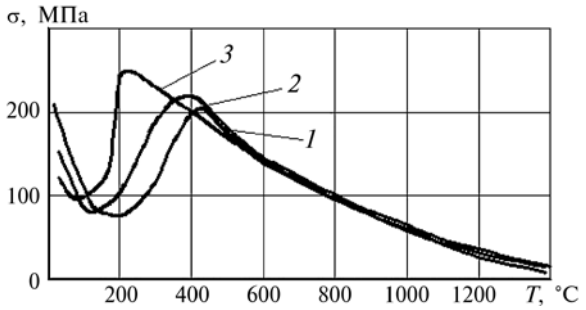


Рис. 1. Влияние комплексного легирования на формирование временных напряжений в металле:
1 — Р18Ю; *2* — 4Х4В10Ю; *3* — 3Х2В8; $T_н$ = 1200 °С

жениями, накопившимися при охлаждении до начала мартенситного превращения.

Снижение временных напряжений в образцах из наплавленного металла обусловлено их релаксацией в момент протекания мартенситного превращения. Из данных рис. 1 следует, что при охлаждении образцов из стали Р18 с температуры 1200 °С наблюдается эффект кинетической пластичности при фазовом превращении, который проявляется в снижении временных напряжений в интервале мартенситных температур. Максимум напряжений на кривой формирования временных напряжений в стали составляет ~240 °С, что довольно близко температуре начала мартенситного превращения стали Р18 при ее закалке с температуры $T_н$ = 1200 °С, а минимум 100 °С соответствует таким температурам $M_к^{усл}$, лежащим выше температуры конца мартенситного превращения $M_к$, при этом ($M_к^{усл} > M_к$), когда степень превращения уже достаточно велика, и в результате образования прочного "каркаса" из многочисленных мартенситных кристаллов возрастает предел текучести, а пластичность сплава начинает уменьшаться. При дальнейшем охлаждении ниже температуры $M_к^{усл}$ напряжения возрастают до 200 МПа за счет некоторого увеличения количества мартенсита.

При этом остаточные напряжения при комнатной температуре в образцах из металла типа 3Х2В8 составляют 200 МПа против 100 МПа у образцов из металла типа 4Х4В10Ю. Это можно объяснить смещением положения кривой формирования временных напряжений у сплава 4Х4В10Ю в область более низких температур, что является следствием дополнительного легирования наплавленного металла углеродом, хромом и алюминием.

Дальнейшее увеличение концентрации углерода и вольфрама в наплавленном металле типа Р18 привело к смещению температурного интервала $M_н — M_к^{усл}$ в область еще более низких температур. Временные напряжения после релаксации в области мартенситного превращения не

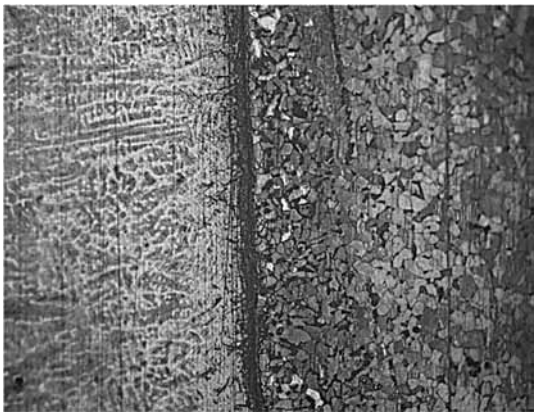


Рис. 2. Структура наплавленного металла в зоне сплавления основного металла с наплавленным металлом типа стали Р18ЮН. ×1000

получили существенного развития, и остаточные напряжения в наплавленном металле Р18 оказались еще ниже, чем в металле типа 4Х4В10Ю.

Как было показано в [1], совместное легирование наплавленного металла углеродом, хромом, вольфрамом и алюминием способствует сохранению более мелкого аустенитного зерна, поэтому у более легированного наплавленного металла типа Р18 мартенсит намного дисперснее мартенсита стали 3Х2В8 (рис. 2).

От степени дисперсности мартенсита зависит полнота использования мартенситного превращения в качестве механизма релаксации внутренних пиковых напряжений. Вероятно, этим также объясняется большая степень релаксации временных напряжений стали Р18. Характерно, что за счет малой величины температурного интервала $M_к^{усл} — T_к$, временные напряжения не успевают получить существенного развития, и при комнатной температуре в образцах из наплавленного металла Р18Ю зафиксирован самый низкий уровень остаточных напряжений.

Наплавленный металл типа стали Р18 обладает достаточно высокой твердостью. Поэтому, решив задачу предотвращения холодных трещин путем дополнительного легирования стали Р18, можно рекомендовать ее в качестве наплавочного материала для разработанных способов наплавки. Для подтверждения правильности вывода о том, что соответствующим легированием наплавленного металла можно регулировать уровень остаточных напряжений, а следовательно, вероятность образования холодных трещин, наплавленный металл типа Р18Ю дополнительно легировали кобальтом и никелем.

На рис. 3 [1] представлены данные о влиянии легирования кобальтом на смещение интервала мартенситного превращения и формирование

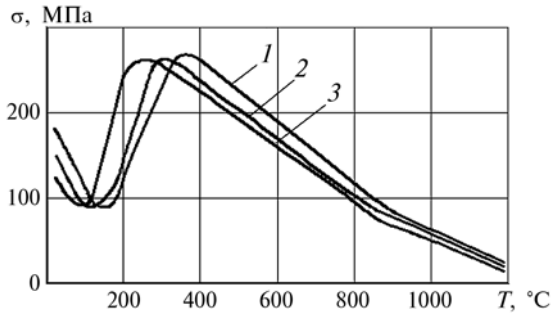


Рис. 3. Влияние легирования наплавленного металла типа Р18 кобальтом на релаксацию временных напряжений:
1 — Р18 + 2 % Co; *2* — Р18 + 1 % Co; *3* — Р18

временных напряжений в образцах из наплавленного металла типа Р18Ю. Как известно, легирование кобальтом приводит к смещению мартенситного превращения в область более высоких температур. Так, при отсутствии кобальта в наплавленном металле Р18Ю, т. $M_н$, определенная по положению максимума на кривой, составляет 180 °С, у легированного 1 % Co она достигает 250 °С, легирование 2 % Co приводит к повышению $M_н$ до 340 °С. Видно также, что смещение точек $M_н$ и $M_к$ в область более высоких температур влечет за собой получение более высокого уровня остаточных напряжений.

Легирование некарбидообразующим никелем ухудшает несколько теплостойкость из-за вызываемого им снижения температур $\gamma \rightarrow \alpha$-превращения. Поэтому никель вводили в небольших количествах (1...2 %). Дополнительное легирование стали Р18Ю никелем привело к смещению положения кривой формирования временных напряжений в область более низких температур, и остаточные напряжения при этом значительно уменьшились, а следовательно, можно ожидать

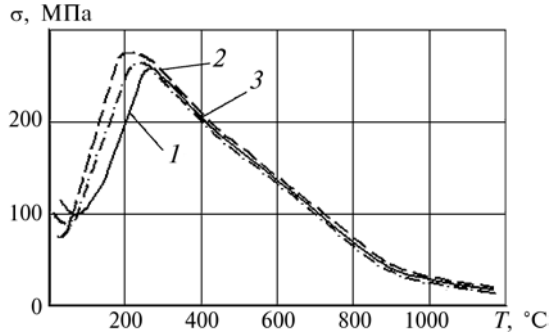


Рис. 4. Влияние легирования стали Р18 никелем на релаксацию временных напряжений:
1 — Р18Ю; *2* — Р18Ю + 2 % Ni; *3* — Р18Ю + 1 % Ni

увеличения стойкости такого металла против образования холодных трещин (рис. 4).

Результаты лабораторных испытаний были проверены при натурных испытаниях исследованных марок наплавленного металла на стойкость против образования холодных трещин. По разработанному способу осуществляли многослойную плазменную наплавку с низкотемпературным подогревом и принудительным охлаждением заготовок из стали 30ХГСА [2]. Температура подогрева немного выше точки начала мартенситного превращения стали Р18Ю, дополнительно легированной 1 % Ni.

При наплавке порошковой проволокой, легированной 2 % Co, трещины, наблюдаемые визуально, образовывались при наплавке первых витков первого слоя. Уменьшение кобальта до 1 % позволяло избежать трещин только в первом слое. Проволокой Р18Ю без трещин наплавляли три слоя. Легирование никелем позволило избежать трещин при пяти-шестислойной наплавке.

Однако в присутствии никеля намного возрастают количество и устойчивость остаточного аустенита, что усложняет последующий отпуск. Поэтому при легировании желательно не вводить значительное количество никеля. Для предотвращения трещин в наплавленном металле достаточно 1 % Ni.

Для плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота в Сибирском государственном индустриальном университете (г. Новокузнецк) разработаны порошковые проволоки, обеспечивающие широкую гамму химических составов и эксплуатационных свойств наплавленного металла.

При наплавке сжатой дугой в азотсодержащих газовых средах наблюдается интенсивное кипение сварочной ванны, так как взаимодействие жидкого металла сварочной ванны с газовой фазой в процессе наплавки приводит к насыщенности металла азотом.

При кристаллизации металла растворимость азота в нем резко уменьшается, избыточный азот выделяется и из-за быстротечности процесса наплавки способствует образованию пористости. Для устранения пористости в состав сердечника порошковой проволоки вводят алюминий, связывающий избыточный азот в не растворимые в жидком металле соединения. Такие соединения частично всплывают на поверхность сварочной ванны, а также остаются в наплавленном металле и могут выступать в роли дополнительной упроч-

няющей фазы. С другой стороны, алюминий, переходящий в твердый раствор, оказывает существенное влияние на процесс структурообразования, увеличивая количество мягких структурных составляющих и тем самым способствуя разрушению наплавленного металла.

В результате исследования процесса структурообразования наплавленных в азоте теплостойких инструментальных сталей высокой твердости установлено, что алюминий неоднозначно влияет на твердость металла после наплавки и отпуска на вторичную твердость.

Алюминий, участвуя в образовании дисперсионных частиц, предположительно нитридов или комплексных оксидов, размером 6...12 мкм, способствует упрочнению металла, однако увеличение его содержания в металле более 1,0 % приводит к увеличению количества δ-феррита и разупрочняет металл. Оптимальным с точки зрения получения максимальной вторичной твердости и предотвращения пористости является концентрация алюминия в наплавленном металле в пределах 0,8...1,0 %.

Для уменьшения склонности к порообразованию, вызванному водородом, в состав сердечника порошковой проволоки дополнительно вводят кремнефтористый или алюмофтористый натрий (Na_2SiF_6, Na_3AlF_6), связывающие водород в соединение [HF].

Разработанные порошковые проволоки обеспечивают получение наплавленного металла типа теплостойких сталей высокой твердости, например: Р18, Р6М5, Р2М9 и т.п. Такие порошковые проволоки предназначены для плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота в целях восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей оборудования и металлообрабатывающего инструмента, когда требуется особенно высокая твердость и износостойкость рабочих поверхностей.

Диаметр изготовляемой порошковой проволоки (2,7 + 3,7) мм; коэффициент наплавки 18...20 Г/(А · ч); коэффициент разбрызгивания не более 3,5 %. Твердость наплавленного металла 52...60 HRC, твердость наплавленного металла после термической обработки (отпуска) — 62...66 HRC. Порошковые проволоки для плазменной наплавки получены на станке для изготовления порошковой проволоки. Производительность станка до 50 кг порошковой проволоки за смену. Шихта порошковой проволоки перемешивалась в специальном устройстве.

На составы шихт для плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота получены пять авторских свидетельств СССР (№ 632139 от 14.07.1978 г., № 623486 от 15.05.1978 г., № 635851 от 07.08.1978 г., № 733213 от 17.01.1980 г., № 1029515 от 16.12.1981 г.).

Заключение. Показано, что соответствующим легированием наплавленного хромовольфрамового металла никелем и алюминием можно повысить его стойкость против образования холодных трещин, применяя при этом низкие (в 1,5—2,0 раза) температуры предварительного и сопутствующего подогрева. При этом упрощается процесс наплавки, повышается ее производительность, максимально используются твердость и износостойкость наплавленного высоколегированного слоя.

Решив задачу предотвращения холодных трещин путем дополнительного легирования стали Р18 никелем и алюминием, можно рекомендовать ее в качестве наплавочного материала для разработанных способов наплавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Малушин Н.Н., Валуев Д.В.** Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 358 с.

2. **Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Осетковский И.В.** Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 10. С. 6—10.

Николай Николаевич Малушин, канд. техн. наук,
nmalushin@mail.ru;
Василий Леонидович Осетковский;
Ринат Акрамович Гизатулин, д-р техн. наук;
Иван Васильевич Осетковский

УДК 681.513:621.7

В.С. Семеноженков *(Воронежский филиал МИИТ)*,
М.В. Семеноженков *(Воронежский государственный технический университет)*

Взаимосвязь точности позиционирования стола револьверной подачи и ее работоспособности

На основе рассмотрения изменения состояния пружин при работе устройства с пружинным аккумулятором энергии показана возможность поломки пружин при алгоритме, предусматривающем необходимость точного попадания поворотного стола при выполнении каждого перемещения. Алгоритм, построенный на принципе сохранения ошибки позиционирования стола при выполнении его следующего перемещения, исключает возможность поломки пружин, обеспечивает стабильное уменьшение этой ошибки и высокую работоспособность устройства.

Ключевые слова: подача; угол поворота; пружина; разгон; торможение; ошибка позиционирования; поломка.

Based on consideration of change of status springs when device is working with spring-loaded battery energy, shows the possibility of breakage of the springs, because of the algorithm, which provides necessity for accurate ingress turntable for each movement. Algorithm which is based on principle of the conservation positioning errors of turntable when its next motion is performed, excludes the possibility of breakage of springs, provides stable reduction this error and high operability of the device.

Keywords: feed; rotation angle; spring; acceleration; braking; positioning error; breakage.

В работе [1] показано, что точность поворота стола револьверной подачи с аккумулятором механической энергии можно обеспечить за счет регулирования длительности включения двигателя. Разгон и торможение поворотного стола осуществляются с помощью пружин аккумулятора, при этом происходят прямые и обратные процессы перехода потенциальной энергии растяжения пружин в кинетическую энергию подвижных звеньев [2]. В этой связи очевидной является необходимость контроля величины растяжения пружины, отклонения от которой могут привести к потере быстродействия или поломке.

Рассмотрим возможный вариант выполнения поворота стола *3*, когда пружина *1* (рис. 1) осуществляла разгон стола при его повороте на угол, составляющий $\varphi_{p1} = 0{,}5\varphi_0$ (φ_0 — шаг поворота стола).

Допустим, что при повороте потери энергии превысили ожидаемые значения, и пружина *2* во время торможения стола растянулась на величину, соответствующую углу $\varphi_{т1}$, меньшую угла φ_{p1}, и отклонение от необходимого угла поворота составило $\Delta\varphi_1$ (рис. 2). При осуществлении следующего движения разгон стола будет осуществляться пружиной *2* и угол поворота стола при разгоне составит $\varphi_{p2} = \varphi_{т1}$. Для обеспечения попадания в следующую позицию ($2\varphi_0$) необходимо, чтобы пружина *1* растянулась на величину, соответствующую углу поворота стола $\varphi_{т2} = 0{,}5\varphi_0 + \Delta\varphi_1$.

Соответствующим образом изменится длина пружины *1* при разгоне стола во время выполнения третьего шага $\varphi_{p3} = \varphi_{т2}$. Для попадания в третью позицию ($3\varphi_0$) необходимо, чтобы пружина *2* растянулась на величину, соответствующую углу поворота стола $\varphi_{т3} = \varphi_0 - \varphi_{p3}$. Энергия, которую необходимо поглотить пружиной *2*, значительно меньше энергии, поступившей в механическую систему от пружины *1*. В такой ситуации необходимо применение тормоза. Разгон подвижных

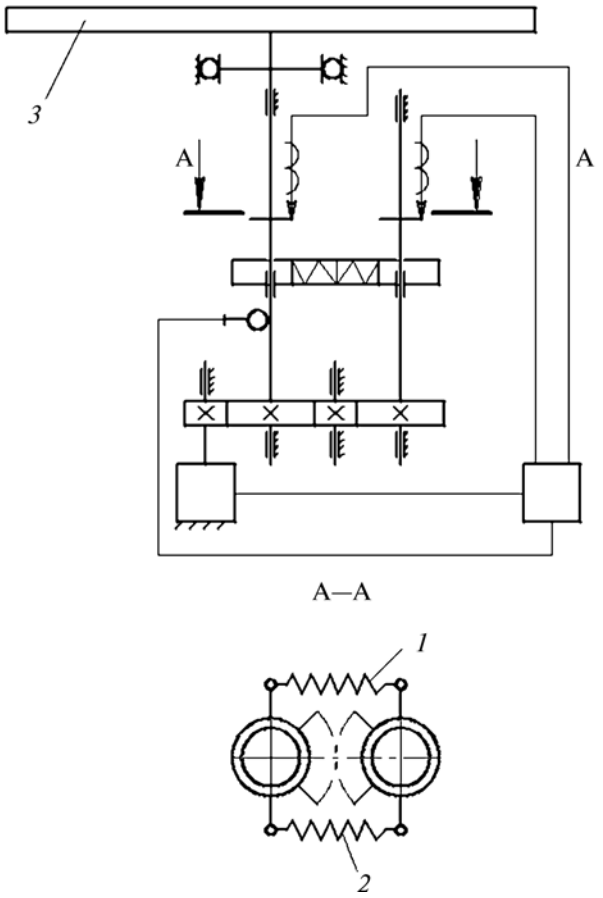


Рис. 1. Схема устройства револьверной подачи с пружинным аккумулятором энергии

звеньев устройства при выполнении следующего движения будет осуществляться за счет потенциальной энергии пружины *2*.

Из рис. 2 видно, что в этом случае энергия, накопленная в пружине *2*, многократно меньше энергии, которую поглотит пружина *1* при повороте стола *3* на очередной угол φ_0. Поэтому такой подход, заключающийся в необходимости при каждом выполнении движения точного попадания в точку позиционирования стола, приводит устройство в неработоспособное состояние.

Рассмотрим состояние пружин устройства в случае организации работы таким образом, что при выполнении каждого движения сохраняется погрешность позиционирования, полученная при выполнении предыдущих перемещений. На рис. 2 штриховой линией показана диаграмма состояния пружин для такого варианта. Сведение погрешности позиционирования стола можно свести к нулю за время поворота следующего за неудачным перемещением. Ниже приведен алгоритм управления устройством.

Момент на валу выбранного револьверной подачи двигателя обозначим $P_{дв}$.

Угол поворота выходного вала будет равен углу $0{,}5\varphi_0$ заведения пружин.

Подается сигнал на выполнение движения и определяется время с момента подачи сигнала до начала поворота выходного звена $\delta t_{к1}$.

Двигатель включается при повороте выходного звена на угол, составляющий $\varphi_{21} = 0{,}5(\varphi_0 - \varphi_{д1})$, и работает в течение времени поворота выходного звена на угол

$$\varphi_{Д1} = \frac{P_с \varphi_0}{u_P P_{дв} \eta},$$

где $P_с$ — момент статических сил сопротивления перемещению стола;

u_P — передаточное отношение передачи вал двигателя—выходной вал устройства;

η — КПД передачи вал двигателя—выходной вал устройства.

После остановки поворотного стола включается сцепная муфта и выполняется измерение угла φ_1 поворота выходного вала.

Вычисляются:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_0;$$

$$\varphi_{т1} = 0{,}5\varphi_0 + \Delta\varphi_1.$$

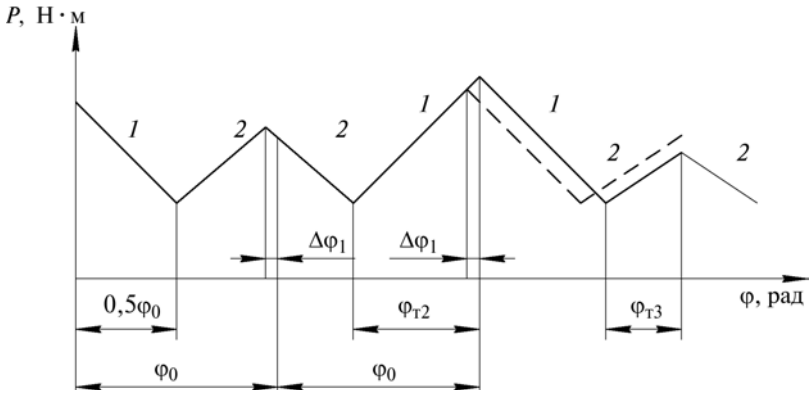


Рис. 2. Диаграмма состояния пружин аккумулятора

Определяется избыток энергии и уточняется значение момента на валу двигателя:

$$T_{U1} = P_{\max}\Delta\varphi_1,$$

где $P_{\max}$ — максимальный момент силы пружины;

$$P_{д1} = \frac{T_{U1} + P_с\varphi_1}{\varphi_{д1}u_P}.$$

Сигнал на выполнение следующего движения подается после остановки выходного вала через время:

$$t_1 = t_{01} - \delta t_{к1},$$

где t_{01} — время паузы (остановки стола) по циклограмме работы устройства.

Выполняется следующее движение. Напряжение на двигатель подается после поворота выходного вала на угол:

$$\varphi_{32} = 0{,}5(\varphi_0 - \varphi_{д2}),$$

где $\varphi_{д2} = \dfrac{P_с(\varphi_{т1} + \varphi_{с1}) - P_{\max}(\varphi_{т1} - \varphi_{с1})}{P_{д1}u_P}$ — угол поворота стола подачи, когда на двигатель подается напряжение:

$$\varphi_{с1} = 0{,}5(1{,}5\varphi_0 - \varphi_{т1} - \Delta\varphi_1).$$

Изложенный алгоритм учитывает индивидуальные характеристики двигателя и свойства конструкции устройства. Фактические соотношения энергетических характеристик зависят от многих факторов и могут изменяться во времени (увеличение или уменьшение сил трения, нагрев двигателя и т.п.). Поэтому после каждого движения эти соотношения уточняются, что позволяет обеспечить необходимую точность позиционирования стола подачи.

Выводы

1. Рассмотренные диаграммы состояния пружин позволили определить основной принцип разработки алгоритма управления устройством револьверной подачи, позволяющий обеспечить высокую точность перемещений стола при исключении возможности поломки пружин.

2. Разработан алгоритм управления устройством револьверной подачи, учитывающий изменяющиеся при работе индивидуальные свойства и характеристики элементов конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Семеноженков В.С., Семеноженков М.В.** Обеспечение точности позиционирования стола револьверной подачи заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 12. С. 27—30.

2. **Пат. 2056261 РФ.** Шаговое поворотное устройство.

Владимир Степанович Семеноженков, д-р техн. наук,
semen_46@mail.ru;
Максим Владимирович Семеноженков, канд. техн. наук

Читайте в следующем номере

❖ **Богатов А.А., Нухов Д.Ш.** Научные основы повышения эффективности процесса ковки при знакопеременной деформации

❖ **Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В., Малышев А.Н.** Параметры формоизменения стержневых изделий с фланцами при закрытой осадке с выдавливанием

❖ **Панченко Е.В., Нам Т.В.** Сверхпластическая формовка однослойной ячеистой оболочки из титанового сплава ВТ6С

УДК 621.226

А.А. Анцифиров, В.А. Кривошеин
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Кинематические параметры штамповки на гидроколенных прессах с небольшой длительностью процесса деформирования

Приведены одна из возможных кинематических схем гидроколенного пресса, на которой конструктивно возможно обеспечить выполнение требуемой кинематики перемещения подвижных узлов пресса в целях достижения необходимой кинетической энергии для процесса штамповки, а также диаграммы зависимости времени деформирования заготовки от окружной скорости коленного шарнира, зависимости начальной скорости деформирования заготовки для угла поворота рычага коленного механизма по отношению к оси пресса 7° и зависимости скорости ползуна от длины этого рычага коленного механизма. Показано, что длительность процесса деформирования на коленных прессах с гидравлическим приводом может быть в интервале 5(10^{-3}...10^{-2}) с, что существенно расширяет применимость гидроколенных прессов в обработке металлов давлением.

Ключевые слова: гидроколенный пресс; кинематические параметры; штамповка; малое время деформирования; модернизация.

This article focuses on the analysis of the kinematic parameters of knuckle joint presses with hydraulic drive, which provides time of stamping commensurate with the duration of the process of deformation on hydraulic hammers. Shows one possible kinematics knuckle joint press with hydro drive where structurally possible to fulfill the required kinematics of moving nodes of press in order to achieve the necessary kinetic energy for the stamping process. Shows the diagram of time dependence of deformation of the billet from the circular velocity of the knuckle joint, depending from initial deformation speed of billet for the rotation angle of the knuckle joint mechanism lever with respect to the press axis 7° and slide speed depending from the length of this knuckle joint mechanism lever. Recognised that the length of the deformation process on the knuckle joint presses with hydraulic drive can be in the range of 5(10^{-3}...10^{-2}) s, which significantly expands the applicability knuckle joint presses with hydraulic drive presses in metal forming.

Keywords: knuckle joint press with hydraulic drive; kinematic parameters; forging; short period of forging; modernization.

Существующие процессы горячей объемной штамповки на коленных прессах с гидравлическим приводом не позволяют выполнять штамповку тонкостенных заготовок, поскольку протекают для выполнения подобных операций обработки металлов давлением за достаточно большое время процесса деформирования, более 0,1 с [1—3], что приводит к износу штампов и невозможности или неэффективности штамповки заготовок небольшой толщины.

Используя результаты [2], в статье приведен анализ кинематических параметров, которые необходимо обеспечивать во время работы коленных прессов с гидравлическим приводом для штамповки поковок с тонкой стенкой.

Выдерживать требуемые параметры, расширяющие применимость гидроколенных прессов для горячей штамповки, в точном интервале и значениях во время процесса деформирования необходимо только за счет применения современных на сегодняшний день автоматизирующих средств управления. Подобными средствами являются программируемые логические контроллеры, гидравлические распределители с электронным управлением; для оценки надежности управления, которое призвано обеспечить надежность штамповки тонкостенных заготовок, необходимо использовать современные средства обратной связи.

Коленные прессы с гидравлическим приводом, например [4], или конструктивно похожее исполнение пресса [5] (рис. 1) зарубежного производства, позволяют осуществлять штамповку поковок при выполнении следующих операций рабочего цикла:

- перемещение подвижных деталей пресса до начала деформирования заготовки, со-

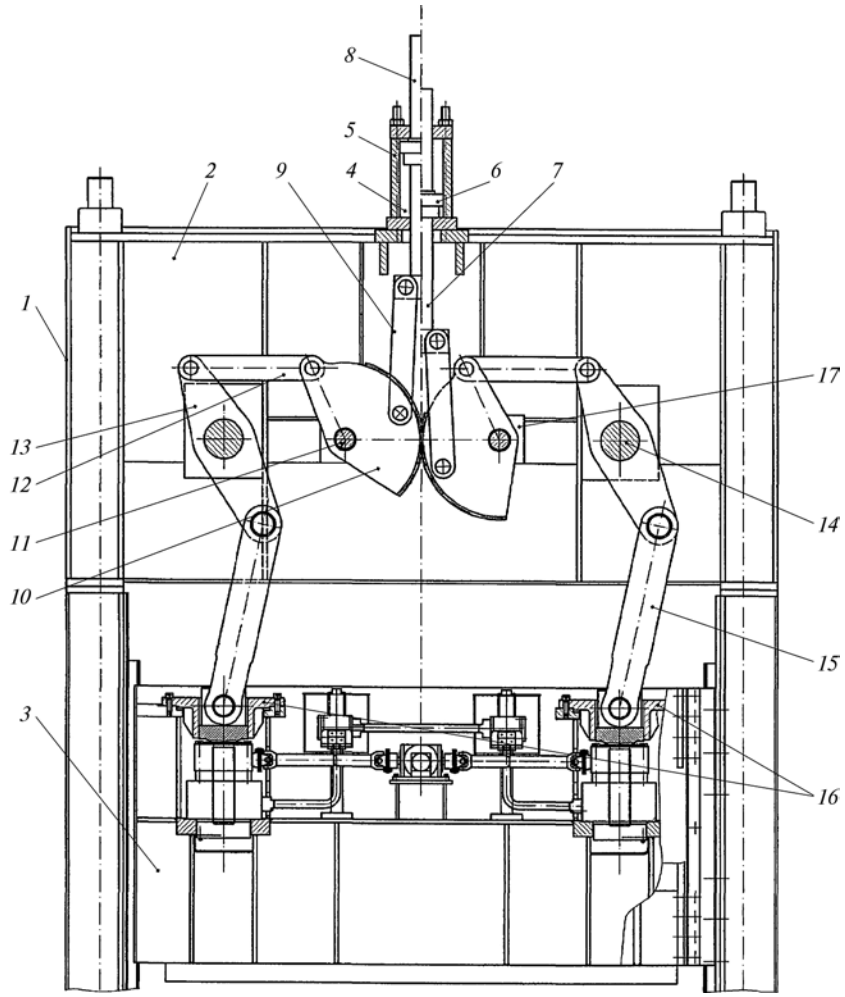


Рис. 1. Гидроколенный пресс фирмы Müller Weingarten AG:

1 — пресс; *2* — станина; *3* — ползун; *4* — цилиндр; *5* — корпус цилиндра; *6* — поршень; *7*, *8* — шток поршня; *9* — рычаг; *10* — зубчатое зацепление; *11* — вал; *12* — рычаг; *13* — двуплечий рычаг; *14* — вал двуплечего рычага; *15* — тяга рычага; *16* — соединение тяги рычага с ползуном; *17* — шарнирное соединение

вершаемое при подаче рабочей жидкости в одну из полостей гидроцилиндра;

- деформирование заготовки силой, многократно превышающей силу, развиваемую гидроцилиндром, при продолжении подачи рабочей жидкости в ту же полость гидроцилиндра, но при более высоком давлении, чем до начала деформирования заготовки;
- возвратный ход при подаче рабочей жидкости в ту же полость гидроцилиндра и вращение рычагов в том же направлении.

Для совершения следующего рабочего цикла рабочая жидкость подается в противоположную полость гидроцилиндра и рычаги вращаются в противоположном направлении.

В этих коленных прессах разгон подвижных деталей привода, ползуна и накопление ими кинетической энергии не предусмотрены, поэтому деформирование заготовки выполняется за счет увеличения силы, развиваемой гидравлическим или пневматическим цилиндром, при этом время контакта инструмента с заготовкой приводит к ее подстыванию и штамповать изделия с тонкой стенкой на таких прессах не представляется возможным.

Штамповка заготовок на прессах, исполнение которых может быть представлено как показано на рис. 2 (А.с. 315625 СССР), заключается в том, что при ходе приближения ползуна к заготовке происходит повышение подачи жидкости в гидровинтовой цилиндр и, соответственно, разгон подвижных деталей пресса, увеличение угловой скорости вращения гидровинтового цилиндра, а также его линейной скорости, увеличение линейной скорости коленного шарнира до 0,85 м/с [6], возможно до 1,5 м/с [6], и накопление кинетической энергии подвижных деталей пресса.

Деформирование совершается за счет кинетической энергии, накопленной подвижными деталями пресса и ползуном при начальной скорости деформирования заготовки 0,23 м/с [6]. Возвратный ход совершается вследствие подачи рабочей жидкости в штоковую полость гидроцилиндра при перемещении подвижных деталей пресса в направлении, противоположном их перемещению при ходе приближения ползуна к заготовке и при ее деформировании.

Недостаток такого способа штамповки на коленном прессе с приводом от гидравлического и гидровинтового цилиндров — большое время деформирования заготовки (более 0,1 с) в результате изменения направления движения деталей привода ползуна после окончания деформирования заготовки, а также — небольших скоростей перемещения подвижных деталей пресса. Мень-

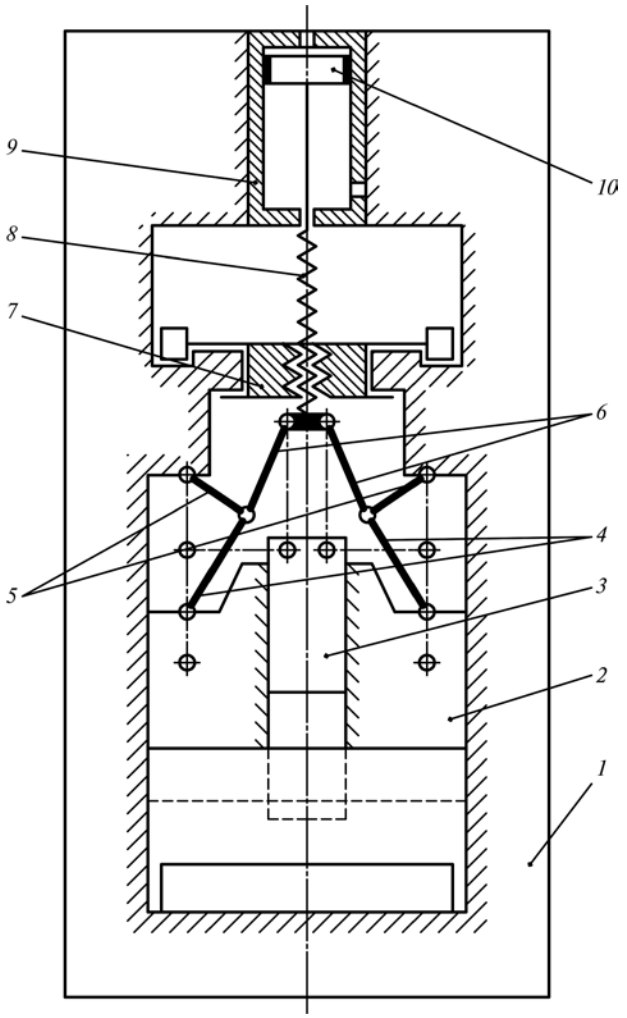


Рис. 2. Коленный пресс с гидровинтовым цилиндром:

1 — станина пресса; *2* — наружный ползун; *3* — внутренний ползун; *4—6* — звенья коленного механизма; *7* — гайка-маховик; *8* — винт; *9* — гидравлический цилиндр; *10* — поршень

шее время деформирования заготовки в случае, если возвратный ход ползуна совершается при движении деталей привода ползуна в том же направлении, что и при этапах разгона и деформирования.

При длительном времени контакта горячей заготовки небольшой толщины со штампом она может остывать ниже допустимой для деформирования температуры. Многоручьевую горячую штамповку тонкостенных заготовок инструмента на таких коленных прессах не применяют.

Решение технической задачи обеспечения параметров штамповки тонкостенных заготовок может быть успешно реализовано на гидроколенном прессе, кинематическая схема которого представлена на рис. 3.

Пресс состоит из станины *1* с первой поперечиной *2*, второй поперечиной *3* и соединяющими их стойками *4* с направляющими *5*; подвижных деталей пресса: ползуна *6*, подвижного в направляющих *5*; коленно-рычажного механизма *7*, со-

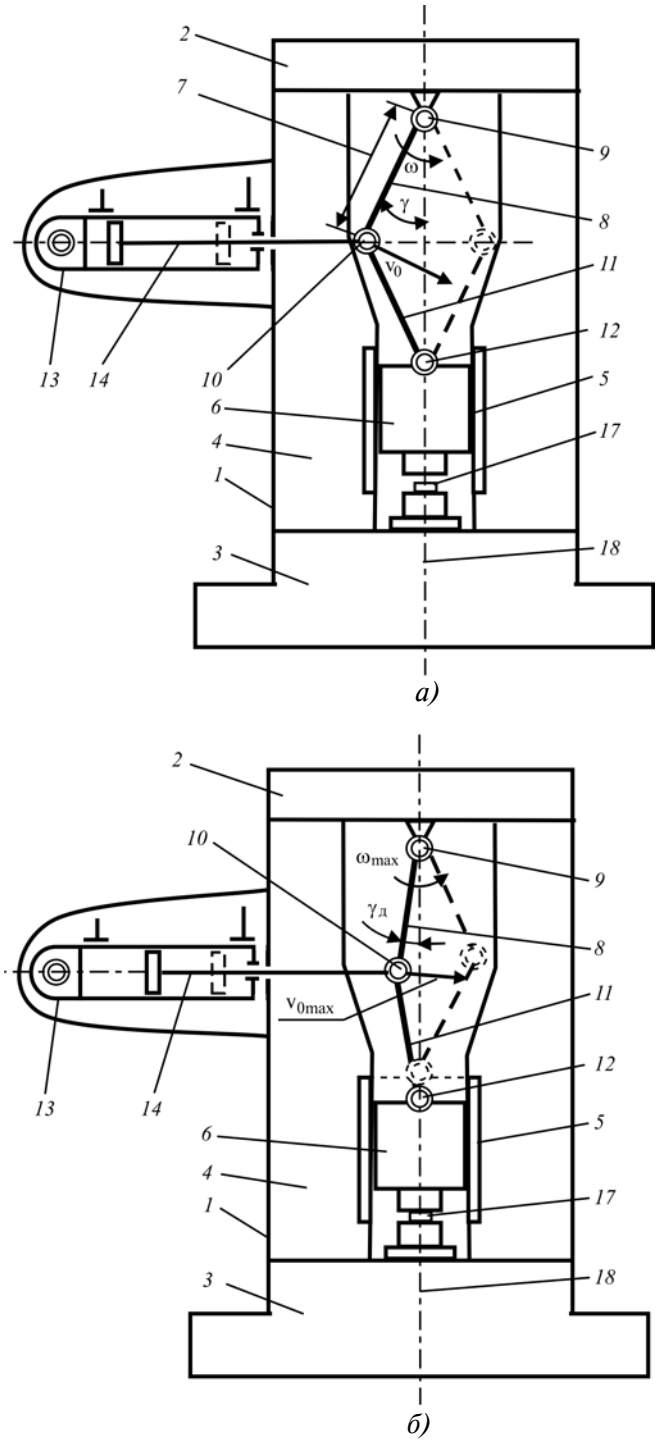


Рис. 3. Схема коленного пресса с гидравлическим приводом от одного цилиндра:

а — момент начала разгона подвижных частей; *б* — момент начала деформирования заготовки

единяющего поперечину *2* с ползуном *6*, имеющего вращающиеся рычаги: первый рычаг *8*, установленный на валу *9* в поперечине *2* и соединяющий ее через коленный шарнир *10* со вторым рычагом *11*, соединенным с ползуном *6* через ползунный шарнир *12*; гидравлического привода (не показан) с гидравлическим цилиндром *13*, подвижные детали *14* которого соединены с коленно-рычажным механизмом *7*, а неподвижные детали *15* — на станине *1* (рис. 5). Первый рычаг *8*, исполненный трехплечим, может быть закреплен на валу *9* с маховиком *16* (рис. 5), позволяющим увеличить момент инерции и кинетическую энергию подвижных частей пресса.

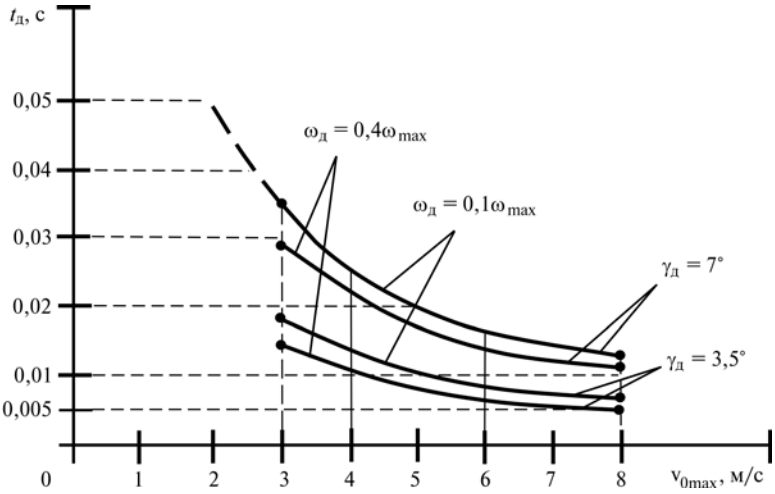


Рис. 4. Зависимость времени деформирования заготовки от окружной скорости коленного шарнира

Основные кинематические параметры, величины которых требуется выдерживать в необходимых интервалах значений представлены также на рис. 3. Штамповка на таком прессе с гидравлическим приводом включает в себя рабочий цикл, состоящий из следующих этапов:

- разгон подвижных деталей пресса для накопления ими заданной кинетической энергии, достаточной для деформирования заготовки;
- деформирование заготовки *17* за счет накопленной кинетической энергии;
- возвратный ход подвижных деталей и рабочего ползуна.

Разгон подвижных деталей пресса совершается до достижения первым рычагом максимальной угловой скорости, $с^{-1}$, выбираемой из диапазона

$$\omega_{max} = \frac{4...6}{l},$$

где ω_{max} и l — максимальная угловая скорость первого рычага и расстояние между центрами поперечного сечения вала и коленного шарнира соответственно.

Такой разгон до скорости ω_{max} центра первого рычага обеспечивает кинетическую энергию подвижных деталей пресса при равных длинах первого *8* и второго *11* рычагов, определяемую выражением:

$$T = \frac{1}{2}\left(I\omega^2 + m\mathrm{v}^2 + I_м\omega^2\right) = \frac{1}{2}\left[\left(I + I_м\right)\omega^2 + m\mathrm{v}^2\right],$$

где ω, I и $I_м$ — угловая скорость и моменты инерции соответственно вращающихся рычагов *8* и *11* и маховика *16*, закрепленного на валу;

v и m — соответственно скорость и масса поступательно движущихся деталей пресса.

Условиями технологического процесса штамповки разгон подвижных деталей пресса и деформирование заготовки совершаются при угле поворота первого рычага, выбираемом из диапазона [6] $\left(\frac{1}{6}...\frac{1}{4}\right)\pi$ рад. За счет изменения угла поворота первого рычага *8* при разгоне регулируется значение кинетической энергии, накапливаемой подвижными деталями пресса.

Для уменьшения длительности процесса деформирования заготовки *17* и времени ее контакта со штампом этап деформирования завершается при угловой скорости первого рычага *8*, превышающей $0{,}1\omega_{max}$ $с^{-1}$ (рис. 4), а возвратный ход ползуна *6* совершается при движении деталей коленно-рычажного механизма *7* и подвижных деталей пресса в том же направлении, что и при их разгоне и деформировании заготовки *17*.

При угловой скорости первого рычага *8*, выбираемой из диапазона $\omega_д < \omega_{max} < 0{,}1$ $с^{-1}$, время контакта заготовки, нагретой до температуры горячей штамповки, со штампом может превысить 0,035 с (рис. 7 для $\gamma_д = 7°$, где $\gamma_д$ — угол между осью *18* пресса (см. рис. 3, *б*) и первым рычагом *8* коленно-рычажного механизма *7* в начале деформирования заготовки *17*), т. е. будет значительно

больше, чем у гидравлического штамповочного молота, но меньше, чем у винтового пресса.

Для значительного снижения времени контакта заготовки *17* со штампом при небольшом избытке кинетической энергии подвижных деталей деформирование заготовки *17* завершают при угловой скорости первого рычага, выбираемой из диапазона (см. рис. 4) $\omega_д = (0{,}1...0{,}4)\omega_{max}$.

При малых углах $\gamma_д \leqslant 3{,}5°$ поворота первого рычага *8* при деформировании (см. рис. 4) длительность контакта штампа с заготовкой *17* может быть примерно такой же, как у гидравлических штамповочных молотов.

Для повышения производительности пресса возвратный ход подвижных деталей совершается при угле поворота первого рычага *8*, выбираемом из диапазона $\left(\frac{1}{6}...\frac{1}{4}\right)\pi$ рад при движении подвижных деталей *14* гидравлического цилиндра *13* и коленно-рычажного механизма *7* в том же направлении, что и при их разгоне и деформировании заготовки *17*, а следующий рабочий цикл совершается при движении деталей *14* и коленно-рычажного механизма *7* в направлении, противоположном их движению при предыдущем рабочем цикле.

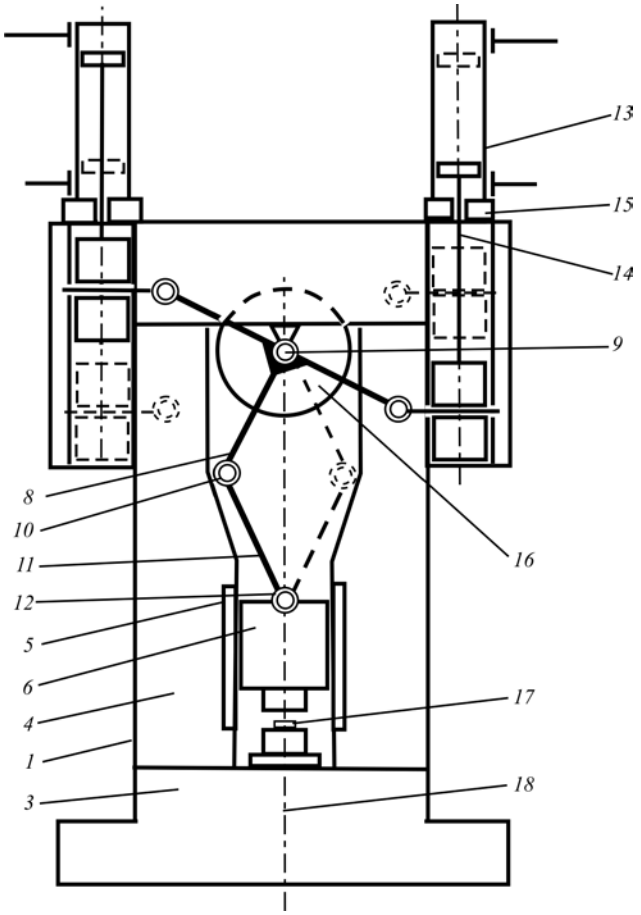


Рис. 5. Схема коленного пресса с гидравлическим приводом от двух цилиндров

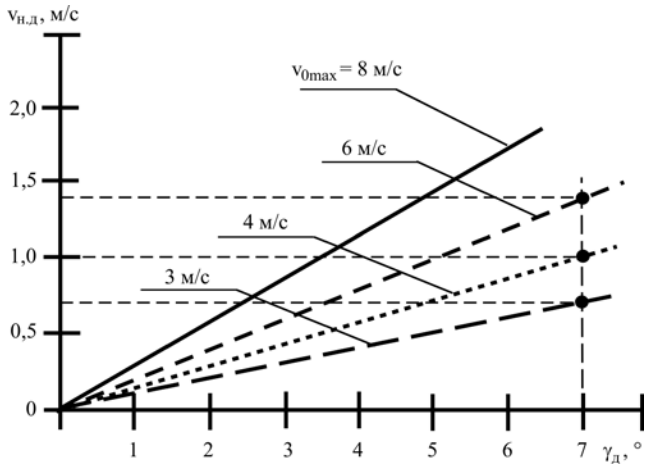


Рис. 6. Зависимость начальной скорости деформирования заготовки для $\gamma_д = 7°$

Для штамповки заготовки *17* по предлагаемому способу коленно-рычажный механизм *7* приводят в возвратно-вращательное движение подвижными деталями *14*, действующими на коленно-рычажный механизм *7* от одного (см. рис. 3) или одновременно двух гидроцилиндров (рис. 5).

Диаграмма зависимости начальной скорости деформирования заготовки *17* при окружной скорости центра коленного шарнира v_{0max} = 3; 4; 6 и 8 м/с и $\gamma_д = 7°$, построенная по данным табл. 1, приведена на рис. 6.

Начальную скорость деформирования заготовки *17* определяют по формуле

$$v_{н.д} = \omega_{max} l \sin\gamma_д = v_{0max}\sin\gamma_д,$$

где $v_{н.д} = (3...8)\sin\gamma_д$, м/с, (см. рис. 6) при $l = 0{,}5$ м;

$v_{0max} = 3...8$ м/с;

l — расстояние между центрами оси или вала первого рычага и коленного шарнира.

Ход $H_д$ рабочего ползуна при деформировании заготовки *17* вычисляют по формуле

$$H_д = 2l(l - \cos\gamma_д).$$

Диаграмма зависимости скорости ползуна *6* в начале деформирования заготовки *17* в зависимо-

1. Начальная скорость деформирования заготовки в зависимости от максимальной угловой скорости первого рычага *8* при равных длинах (0,5 м) первого рычага *8* и второго рычага *11*

Угол $\gamma_д$, °	$\sin \gamma_д$	Ход деформирования заготовки $H_д$, мм	Начальная скорость деформирования заготовки, м/с			
			Угловая скорость первого рычага *8* в начале деформирования заготовки, $с^{-1}$			
			6	8	12	16
1	0,018	0,2	0,108	0,144	0,216	0,288
2	0,035	0,7	0,210	0,280	0,420	0,560
3	0,052	1,4	0,300	0,400	0,600	0,800
4	0,069	2,5	0,420	0,560	0,840	1,120
5	0,087	3,9	0,520	0,700	1,040	1,400
6	0,105	5,5	0,600	0,800	1,200	1,600
7	0,122	7,4	0,750	1,000	1,500	—

2. Сравнение параметров процесса деформирования заготовки для коленного пресса с гидравлическим приводом и других штамповочных машин

Наименование кузнечно-штамповочных машин	Начальная скорость деформирования $v_н$, м/с	Длительность, с		Частота рабочих ходов с номинальной энергией *n*, $мин^{-1}$
		процесса деформирования $t_д$	рабочего цикла $t_ц$	
Гидравлические штамповочные молоты	3...8	$10^{-3}...10^{-2}$	0,75...1,5	40...90
Коленные прессы с гидравлическим приводом, работающие по предложенному способу	0,5...1,5	$5(10^{-3}...10^{-2})$	0,75...1,5	40...90
Винтовые прессы с гидравлическим приводом	0,5...1,5	$10^{-2}...10^{-1}$	1...3	5...40
Коленно-рычажные прессы с электромеханическим приводом	0,10...0,15	$10^{-1}...5 \cdot 10^{-1}$	1...3	20...60

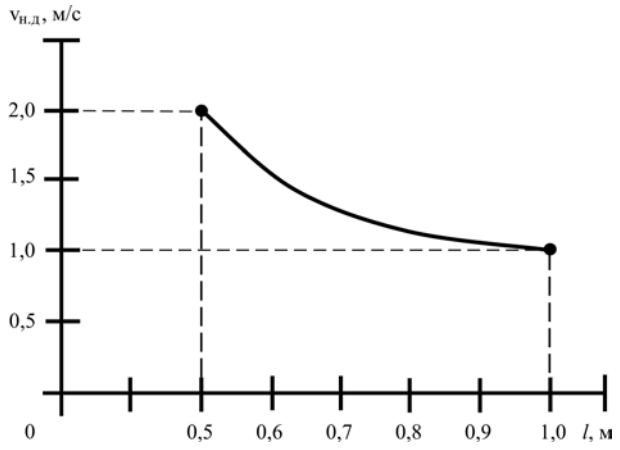


Рис. 7. Зависимость скорости ползуна от длины рычага коленного механизма

сти от длины l = (0,5...1) м первого рычага *8* показана на рис. 7.

Учитывая, что рекомендуемые скорости горячего деформирования сталей находятся в интервале 0,6...2,5 м/с, использование гидравлического привода со скоростью подвижных деталей *14* гидравлического цилиндра *13* до 8 м/с позволяет существенно увеличить технологические возможности коленных прессов с гидравлическим приводом путем повышения скорости рабочего ползуна и существенно уменьшить длительность процесса деформирования заготовки. Снижение окружной скорости коленного шарнира ниже 3 м/с вызывает существенное увеличение дли-

тельности процесса деформирования до 0,05 с, а ее повышение более 8 м/с приводит к значительному росту начальной скорости деформирования заготовки и к ударным явлениям.

Данные для сравнения параметров процессов деформирования на различных прессах и гидравлических штамповочных молотах приведены в табл. 2.

Заключение

Рассмотренные параметры штамповки на коленных прессах с гидравлическим приводом обеспечивают существенное снижение времени контакта с заготовкой по сравнению с известными способами. Энергетически эффективной является штамповка на коленном прессе с гидравлическим приводом при окружной скорости коленного шарнира 4...6 м/с, приемлема эксплуатация при 8 м/с, а при дальнейшем увеличении этой скорости происходит интенсивное снижение КПД гидропривода и процесса штамповки.

Штамповка на коленном прессе с гидравлическим приводом, в процессе которой функциональные параметры процесса деформирования заготовки (начальная скорость деформирования заготовки (см. рис. 6), длительность этапа деформирования (см. рис. 4)) занимают промежуточное положение между параметрами процессов деформирования на гидравлическом штамповочном молоте и винтовом прессе на сегодняшний день является новым перспективным направлением для заготовительного производства.

Подход к штамповке на гидроколенных прессах с параметрами, рассмотренными в статье, может вызвать интерес не только у отечественных производителей кузнечно-прессового оборудования с гидравлическим приводом, но и у зарубежных, например таких как китайский производитель гидропрессового оборудования Anyang forging press machinery.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность Александру Алексеевичу Хорычеву за предоставленный материал, использованный в публикации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Машиностроение**. Энциклопедия / Редсовет: К.В. Фролов и др. Т. IV — 4 / Ю.А. Бочаров и др. Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства. М.: Машиностроение, 2005.

2. **Пат. 2425728 Российская Федерация, МПК B21J5/02, B21J9/02, B30B1/08**. Способ штамповки на коленном прессе с гидравлическим приводом / Заявитель и патентообладатель А.А. Хорычев. № 2010112970/02; заявл. 06.04.2010; опубл. 10.08.2011.

3. **Хижнякова Л.В.** Разработка технологических параметров штамповки осесимметричных поковок из алюминиевого сплава А356 в твердожидком состоянии (тиксоштамповки): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 16 с.

4. **Пат. 202004020750 U1 DE, МПК B 30b.** Пресс для производства формованных деталей из пластика / заявитель Müller Weingarten AG. № 202004020750.8; заявл. 23.09.2004; опубл. 26.01.2006.

5. **Пат. 19918700 A1 DE, МПК B 30b.** Привод гидромеханического пресса / заявитель Müller Weingarten AG. № 19918700.2; заявл. 26.04.1999; опубл. 02.11.2000.

6. **Бочаров Ю.А.** Кузнечно-штамповочное оборудование. М.: Академия, 2008. 480 с.

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

УДК 621.774.6

С.И. Вдовин, Н.В. Татарченков, К.С. Лунин
(Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел)

Позиционирование дорна при гибке труб

Определено изменение сечений трубы при ее гибке наматыванием на круглый копир в зависимости от позиции дорна с шаровым закруглением.

Ключевые слова: жесткопластический материал; аппроксимация формы изогнутой оси; вариационный метод; координатные функции перемещений.

The change in the sections of the tube due to it bending winding on the circular cam depending on the position of the drift-pin with spherical curve is determined.

Keywords: rigid-plastic material; approximation of bent axis; variational method; coordinate functions of displacements.

Применение дорнов препятствует уменьшению высоты сечений и потере устойчивости изгибаемой трубы. Обычно используют дорны жесткой конструкции с законцовкой в форме полушария (рис. 1).

Позиция дорна с недоходом риски, показанной штриховой линией, либо ее переходом через ось копира подбирается при отладке операции в зависимости от технических требований к сохранению внутреннего диаметра трубы. Разброс значений последнего компенсируют изготовлением комплекта дорнов с тем, чтобы выдерживать рекомендуемый зазор. Его радиальное значение δ_r приблизительно соответствует на схеме смещению дорна, вызванному реакцией трубы.

Протяженность участка заготовки, прилегающего к желобу копира, увеличивается в процессе гибки, тогда как размер z_1 переходной зоны остается стабильным. Считается, что кривизна изогнутой оси $1/R$ также стабилизируется на выходе из указанной зоны. Идеализированной схеме гибки труб в отсутствие дорна и деформирования сечений соответствует аппроксимация формы изогнутой оси уравнением

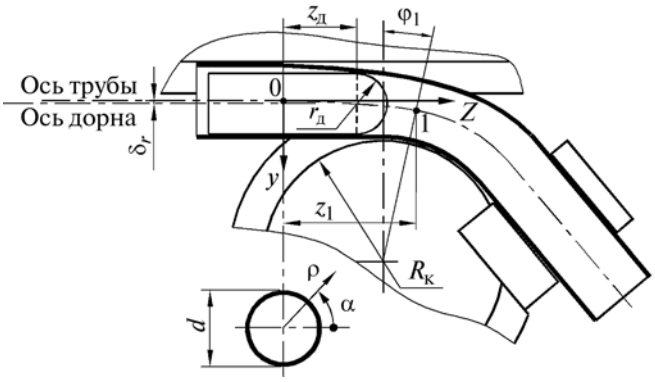


Рис. 1. Схема гибки трубы наматыванием на круглый копир

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_0}\left(\frac{z}{z_1}\right)^{1/n}, \qquad (1)$$

где R_0 — радиус участка заготовки, прилегающего к копиру, равный $R_к + 0{,}5d$; n — показатель степени функции напряжения текучести $\sigma_s = A\varepsilon_i^n$ [1].

При выводе (1) использовали соотношение моментов внутренних сил: $M/M_1 = z/z_1$, выраженных интегралом по половине площади F сечения трубы: $M=\frac{2A}{R^n}\int\limits_{F/2}(\rho\sin\alpha)^{n+1}dF$; M_1 — значение M в т. 1 на рис. 1.

Овальность сечений, приобретаемая трубами при гибке, уменьшает их сопротивление изгибу; уточненная формула $M=\int\limits_F \sigma_z(\rho\sin\alpha)dF$ учитывает уменьшение σ_z по сравнению с напряжением текучести, вызванное появлением окружных напряжений σ_α, а также ростом касательных напряжений. Соответствующая корректировка уравнения (1) заключается в подборе условного показателя степени n, обеспечивающего равенство значений M_1, подсчитанных по двум приведенным выше интегральным формулам моментов. В последнюю из них подставляем истинный показатель степени n функции упрочнения материала, а в предыдущую — его условный аналог, который оказывается больше истинного примерно в 2 раза.

Размер z_1 переходной зоны находим из геометрических уравнений:

$$R_0\left(1-\cos\varphi_1\right)+0{,}5\left(H_0-H_{\min}\right)=\frac{z_1^2}{(m+1)(m+2)R_0};$$
$$\varphi_1=\operatorname{arctg}\frac{z_1}{(m+1)R_0}, \quad (2)$$

где H_0, $H_{\min}$ — высота сечений в т. 0 и 1 на рис. 1;

m — обратная величина условного показателя степени n.

Минимальная высота сечений трубы при бездорновой гибке определяется решением вариационной задачи. Используются координатные (по Ритцу) функции перемещений:

$$u_r=\frac{r^2}{R}\left[\nu_1(\sin^2\alpha+\sin^3\alpha)+b\cos^2\alpha\right];$$
$$u_\alpha=\rho(\rho-r)\int\Delta\xi d\alpha+\frac{\nu_2\cos\alpha}{R}\left(r^2+\rho^2\right)+ \quad (3)$$
$$+\nu_3\frac{r^2}{R}\cos\alpha\left(\sin\alpha+\sin^2\alpha\right),$$

где r, $\Delta\xi$ — радиус средней линии сечения и изменение ее кривизны соответственно; ν_i — варьируемые параметры; ρ, α — полярные координаты (см. рис. 1).

Функция u_r, ответственная за овальность сечения, задает радиальное перемещение точек средней линии с учетом ограничивающего влияния желоба копира. Ее отличие от известных аналогов состоит в том, что при $\alpha=-\pi/2$ $u_r=0$. Кроме того, заданный параметр b, равный зазору желоба по отношению к диаметру трубы, ограничивает увеличение ширины сечения ΔB.

Первый компонент функции u_α (3) адекватен изгибной деформации $\frac{du_{\alpha1}}{\rho d\alpha}=(\rho-r)\Delta\xi$, по данным Б.С. Билобрана (Сплющивание тонкостенных труб при холодном пластическом изгибе // Кузнечно-штамповочное производство. 1968. № 7. С. 20—23) $\Delta\xi\approx-\frac{1}{r^2}\left(u_r+\frac{d^2u_r}{d\alpha^2}\right)$. Второй и третий компоненты функции, обозначенные $u_{\alpha2}$ и $u_{\alpha3}$ на рис. 2, моделируют перераспределение материала по периметру сечения — в основном из области сжатия в область растяжения с учетом несимметричной овализации сечений.

Приближенные формулы деформации по длине материального волокна и соответствующего перемещения:

$$\varepsilon_z=\frac{\rho\sin\alpha}{R}+\varepsilon_0;\ u_z=\frac{\rho\sin\alpha}{(m+1)R_0z_1^m}z^{m+1}+\varepsilon_0z;$$
$$\varepsilon_0=\frac{-r}{2R}(\nu_1+b),$$

содержат относительное удлинение оси трубы ε_0. Оно вызвано уменьшением высоты сечения и соответственно — его площади. Другие факторы,

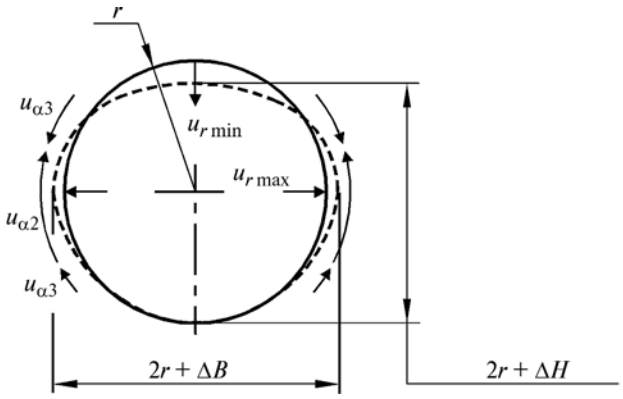


Рис. 2. Схема деформирования средней линии стенки трубы и перемещений ее точек

влияющие на изменение длины оси, включая силы трения, не учитывали.

Радиальное перемещение материального волокна u_ρ определяется интегрированием условия постоянства объема с граничным условием $u_\rho\big|_{\rho=r}=u_r$. Имея формулы перемещений, выражаем деформации и интенсивность деформаций сдвига $\Gamma=2\left[\varepsilon_\rho^2+\varepsilon_\rho\varepsilon_z+\varepsilon_z^2+0{,}25\left(\gamma_{\rho\alpha}^2+\gamma_{\alpha z}^2+\gamma_{z\rho}^2\right)\right]^{0,5}$.

Разрешающие уравнения вариационной задачи:

$$\frac{\tau_s}{2\Gamma_c}\int_V\frac{d\Gamma^2}{d\nu_i}dV+\varphi\frac{dM}{d\nu_i}=0, \quad (4)$$

где τ_s — касательное напряжение текучести жесткопластического неупрочняемого материала; V — объем участка трубы длиной $R_0\varphi$; Γ_c — среднее значение Γ.

Формула $M=\frac{2\tau_s}{\Gamma_c}\int_F\left(\varepsilon_z-\varepsilon_\rho\right)\rho\sin\alpha dF$, полученная в пренебрежении упрочнением материала и радиальным напряжением, обеспечивает линеаризацию уравнений (4), интегрирование которых выполняется по исходным размерам сечения с использованием объектно-ориентированного подхода [2]. Включение в разрешающую систему уравнений выборочного условия равновесия внутренних сил [2] существенно сблизило рассчитанные и действительные размеры деформированного сечения трубы. Соблюдение равновесия обеспечивалось подбором значения параметра ν_3 функции u_α (3) при этом число уравнений (4) и содержащихся в них неизвестных сократилось до двух (ν_1, ν_2).

Рассчитанное уменьшение высоты сечения изогнутой трубы существенно зависит от заданного параметра b функции u_r, равного $r_к$ — $0{,}5d$ в обозначениях на рис. 3.

Расчеты выполняли по исходным данным: материал трубы сплав Д16М; d = 30 мм; толщина стенки t = 1,8 мм. Данные опытной гибки при

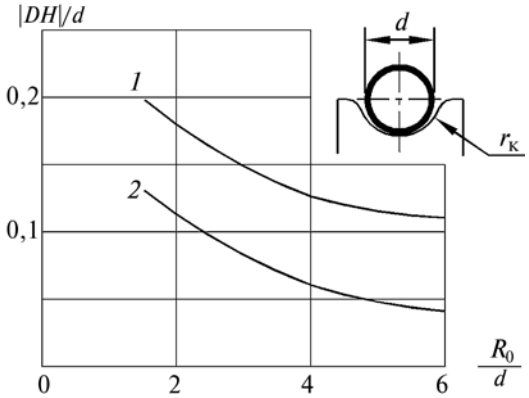


Рис. 3. Уменьшение высоты сечения при *b/d* = 0,033 (*1*) и *b* = 0 (*2*)

$R_0/d = 4$ и $(r_к - 0{,}5d)/d = 0{,}033$ практически совпали с кривой *1* (см. рис. 3). Близкими оказались также рассчитанная и действительная высота сечения H при использовании дорна. Она ограничивается величиной $H_{огр} \approx 2(r_д + t)$ в случае установки дорна с недоходом; при установке с опережением $H_{огр} \approx \approx r_д\left(1+\frac{1}{\cos\beta}\right)+R_к\left(\frac{1}{\cos\beta}-1\right)+2t$ согласно схеме на рис. 4.

Эффект применения дорна тем значительней, чем больше величина $H_{огр}$ отличается от условной высоты того же сечения при бездорновой гибке

$$H_{усл} = d + 2\nu_1 \frac{r^2}{R_д}, \qquad (5)$$

где $R_д = R_0\left(\frac{z_1}{z_д}\right)^m$, $z_д = z_к + \Delta z_д$, $z_к = z_1 - R_0\sin\varphi_1$.

Заменяем в формуле (5) $H_{усл}$ на $H_{огр}$ и ν_1 на $\nu_{усл}$, тогда $\nu_{усл} = (H_{огр} - d)R_д/r^2$. Рассчитываем минимальную высоту сечений трубы, изогнутой с применением дорна, как $H_{min} = d + 2\nu_{усл}r^2/R_0$.

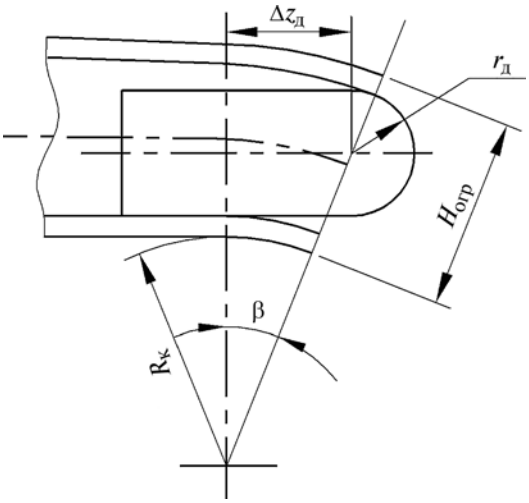


Рис. 4. Ограничение высоты сечения при установке дорна с опережением

Таблица данных измерений и расчета высоты сечений

$\Delta z_д$	$H_{факт}$	H_{min}	$\nu_{усл}$
–4	27,2	27,51	–0,750
–2	27,65	27,68	–0,699
0	27,85	27,84	–0,653
2	28,0	28,01	–0,602
4	28,3	28,22	–0,537
6	28,8	28,47	–0,461
8	29,0	28,75	–0,376
10	29,25	29,06	–0,284

Результаты расчета и опытной гибки труб, представленные в таблице, оказались достаточно близкими.

Предложенная методика определения H_{min} при гибке с дорном может использоваться в практических расчетах. Она заключается в замене значения варьируемого параметра ν_1, ответственного согласно (3) за уменьшение высоты сечения при бездорновой гибке и равного в данном примере –1,15, его условным аналогом $\nu_{усл}$ согласно приведенным выше формулам.

Заключение

Позиционирование дорна при отладке операции гибки труб осуществляется по риске, показанной штриховой линией на рис. 1. По заданному смещению $\Delta z_д$, отрицательному при установке с недоходом и положительному при опережении, вычисляем координату $z_д$, используя геометрические параметры переходного участка z_1 и φ_1, определяемые уравнениями (2). Рассчитав ожидаемое значение итоговой высоты сечений H_{min} изогнутой трубы, определяем дальнейшие действия. Если рассчитанная высота сечений удовлетворяет техническим требованиям, запускаем опытную гибку с заданным смещением дорна. В противном случае корректируем величину $\Delta z_д$ и повторяем расчет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Вдовин С.И.** Теория и расчеты гибки труб. М.: Машиностроение, Орел: ОрелГТУ, 2009. 96 с.

2. **Вдовин С.И., Федоров Т.В.** Инженерный метод вариационной оценки пластических деформаций: учебное пособие для высшего профессионального образования. Ч. 1. Гибка труб. Орел: Госуниверситет — УНПК, 2013. 93 с.

Сергей Иванович Вдовин, д-р техн. наук,
vdovostu@mail.ru;
Николай Владимирович Татарченков;
Константин Сергеевич Лунин

УДК 621.771

Г.Н. Гурьянов, Б.М. Зуев, В.Д. Егоров
(ОАО "Научно-исследовательский институт метизной промышленности", г. Магнитогорск)

К разработке прогрессивного производства проволоки и канатов в северном исполнении

Приведены научно-исследовательские и прикладные задачи, которые были решены при разработке технологического процесса производства проволоки и канатов в северном исполнении. Даны результаты сравнения механических свойств канатной проволоки из разных углеродистых сталей и проволоки из канадского каната. Сделан выбор конструкции каната, канатной смазки, марки стали для проволоки, разработана технология производства проволоки и канатов, утверждена техническая и технологическая документация на производство проволоки и канатов в северном исполнении.

Ключевые слова: проволока; канат; волочение; качество; химический состав сталей; хладостойкость; прочность; пластичность; усталостная стойкость; методики испытания; оптимизация режимов волочения.

Research and applied problems, which are solved in the development of the technological process of production of wire and ropes in North version are presented. The results of the comparison of the mechanical properties of the rope wire from different carbon steels and wire from canadian rope are given. The design choice of rope, rope lubricant, steel wire is made, the technology for the production of wire and ropes is developed, technical and technological documentation for the manufacture of wire and ropes in North version is approved.

Keywords: wire; rope; drawing; quality; chemical composition of steels; cold resistance; strength; ductility; fatigue resistance; testing methods; optimization of drawing modes.

Современная Россия приступает к активному освоению арктического шельфа. Для этого необходимы машины, оборудование, механизмы и метизы в северном исполнении. В Советском Союзе отсутствовала нормативная техническая и технологическая документация на серийное производство метизов для эксплуатации в условиях Севера. Поэтому в 90-е годы прошлого столетия Министерством СССР были приняты Постановления, предусматривающие отечественное производство техники для Севера.

В частности, основанием для разработки и освоения производства канатов в климатическом исполнении ХЛ1 был приказ МЧМ СССР № 1028 от 10.11.87 г. Ответственным исполнителем этого приказа был Магнитогорский Всесоюзный научно-исследовательский институт метизной промышленности (ВНИИметиз). После распада Союза не проводились систематические исследования по совершенствованию технологий производства проволоки и канатов для Севера как в России, так и ближнем зарубежье.

При разработке технологических процессов производства проволоки и канатов в климатическом исполнении ХЛ1 решили ряд научно-прикладных задач. На рис. 1 показаны объекты исследования этой разработки, а основные ее результаты приведены в отчете по НИР (Разработка и освоение производства канатов в северном исполнении / В.Я. Киселев, Г.Н. Гурьянов, Г.В. Баталов и др. Магнитогорск: ВНИИметиз, 1989. № Г.Р. 01880020051. 168 с.) и [1, 2].

При проведении НИР имели фрагментарные данные о зарубежных показателях качества проволоки и канатов в северном исполнении. Дополнительно для оценки качества разрабатываемых

канатов и их проволоки использовали имеющийся в распоряжении НИИметиза канат канадского производства, предназначенный для эксплуатации в условиях Севера.

Результаты испытания проволоки из импортного каната показали, что ее однородность механических свойств несколько выше, чем у проволоки в отечественных канатах общего назначения, например, по ГОСТ 7668—80. Более высокая однородность механических свойств проволоки, взятой из каната, указывает не только на стабильность технологического процесса производства проволоки и стали для ее изготовления, но и на правильный подбор проволок для каната и качественное проведение самого процесса его свивки.

В табл. 1 приведен фактический химический состав сталей, использованных при изготовлении опытных партий канатной проволоки и проволоки из канадского каната. Требования к химическому составу опытной стали с добавкой ванадия 0,06 % были регламентированы техническим соглашением. Содержание нежелательных элементов серы и фосфора в опытной стали с ванадием, стали для металлокорда по ТУ 14-1-1881—76 и в канадской проволоке примерно одинаковое.

При проведении НИР выполнили поиск рациональной технологии производства канатной проволоки. Для этого использовали методику оценки качества продукции комплексным методом. Методика предусматривает случай оценки качества продукции, когда отсутствуют полностью или частично данные о базовых значениях показателей качества. По различным режимам изготовляли опытные партии проволоки из четырех марок сталей и определяли временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, число гибов $n_г$ и скручиваний $n_{скр}$ до разрушения опытной по соответствующим ГОСТам. Также провели аналогичные испытания импортной проволоки диаметрами 0,85; 1,01 и 1,12 мм, взятой из каната импортного производства (Канада). Для примера в табл. 2 приведены результаты испытания опытной канатной проволоки из стали 70 по ТУ 14-1-1881—76 с размерами диаметра 0,81; 1,02 и 1,10 мм и канадской проволоки.

Оценку качества выполнили при разных значениях коэффициентов весомости для трех показателей качества канатной проволоки. Данные табл. 2 отражают одинаковый уровень механических свойств проволоки из стали 70 и импортной проволоки при оценке качества по комплексному показателю. Проволока из опытной стали 70 с ванадием (опытные образцы проволоки изготовлены

Рис. 1. Объекты исследования при разработке технологического процесса производства канатов в северном исполнении

1. Фактический химический состав сталей, использованных при изготовлении опытных партий проволоки, и стали проволоки из канадского каната

Марка стали	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
70 (ТУ 14-1-1881—76)	0,70...0,74	0,30...0,70	0,25...0,37	< 0,015	< 0,015	< 0,05	< 0,05	< 0,05
65Г (ГОСТ 14959—79)	0,62...0,70	0,90...1,20	0,17...0,37	< 0,025	< 0,025	< 0,10	< 0,15	< 0,20
65КК (ОСТ 14-15-37—65)	0,65...0,70	0,40...0,70	0,25...0,45	< 0,030	< 0,030	< 0,10	< 0,10	< 0,15
Импортный аналог (Канада)	0,65...0,69	0,56...0,80	0,12...0,26	0,007...0,009	0,016...0,023	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Опытная сталь 70 (0,06 % V)	0,68...0,72	0,17...0,33	0,40...0,70	< 0,015	< 0,015	< 0,10	< 0,15	< 0,10

2. Механические свойства канатной проволоки

Показатель качества и число испытаний (n)	Опытная проволока			Импортная проволока		
	диаметром, мм					
	0,81	1,02	1,10	0,85	1,01	1,12
$\sigma_в$, МПа (n)	2162 (36)	2116 (36)	2094 (42)	1972 (30)	1995 (30)	1984 (30)
$n_г$ (n)	21,9 (35)	14,2 (36)	14,2 (42)	18,5 (30)	17,3 (30)	12,2 (30)
$n_{скр}$ (n)	36,3 (36)	36,3 (36)	38,5 (42)	39,9 (30)	41,7 (30)	41,3 (30)

сотрудником НИИметиз А.А. Соколовым), как и проволока из стали 70 по ТУ 14-1-1881—76 показала высокие механические свойства. Комплексный критерий качества для проволоки из сталей 65Г и 65КК несколько ниже, чем для проволоки из стали 70 и для канадской проволоки.

При выполнении НИР разработаны конструкции волочильного инструмента с развитой гидродинамической подачей смазки в очаг деформации проволоки и интенсивным охлаждением его рабочей зоны, что снижает температуру деформирования и интенсивность деформационного старения углеродистой стали, а также повышает стойкость волочильного инструмента и однородность механических свойств по длине проволоки [3, 4].

Разработанные нестандартные методики испытания проволоки и каната при низких температурах реализованы в Магнитогорском "НИИметиз" и Одесском ПО "Холодмаш". Установлены особенности влияния низких температур испытания углеродистой проволоки на ее прочность, пластичность и выносливость.

Сила разрыва $P_в$ увеличилась на 3...8 % при снижении температуры испытания с +24 до −60 °С. При этом марка стали и степень наклепа проволоки не оказали влияния на рост силы $P_в$. Число скручиваний до разрушения проволоки снижается от действия низкой температуры в 1,5—6,0 раз в зависимости от степени деформации проволоки.

В табл. 3 приведены результаты испытания проволочных образцов диаметром 1,8 мм из разных марок сталей на скручивание при +20 и −55 °С. В табл. 3 указаны степень технологической деформации Q и отношение средних значений числа скручиваний при положительной и отрицательной температуре ($n^+_{скр} / n^-_{скр}$). Длина образцов проволоки при кручении составляет 320 мм и обусловлена размерами камеры для их охлаждения.

С увеличением степени деформации снижается отрицательное влияние низкой температуры на показания $n_{скр}$. Статистический анализ средних значений числа скручиваний образцов с использованием критерия Стьюдента показал отсутствие существенного влияния марки стали на число скручиваний при отрицательной температуре и несколько большую величину $n_{скр}$ у качественной стали 70 по ТУ 14-1-1881—76 при комнатной температуре.

3. Число скручиваний до разрушения образцов проволоки диаметром 1,8 мм при +20 °С ($n^{+}_{скр}$) и –55 °С ($n^{-}_{скр}$)

Марка стали	Q, %	$n^{+}_{скр}$	$n_{скр}$	$n^{+}_{скр} / n^{-}_{скр}$
65КК	70,2	54; 47; 74; 75; 52	7; 10; 7; 14; 9	6,5
	81,6	46; 48; 60; 44; 65	8; 8; 11; 13; 8	6,0
	90,4	49; 36; 49; 49; 47	39; 41; 43; 39	1,2
65Г	70,2	45; 81; 44; 74; 44	7; 4; 7; 5; 6; 7	9,4
	81,6	46; 48; 60; 44; 65	8; 8; 11; 13; 8	4,7
	90,4	49; 36; 49; 49; 47	39; 41; 43; 39	1,2
70	61,5	45; 43; 45; 81; 77	7; 8; 8; 8; 7; 7	8,2
	77,6	60; 55; 59; 76; 63	16; 17; 24; 17	3,5
	87,0	50; 66; 71; 51; 48	46; 40; 37; 30	1,5

4. Угол наклона α_p и предельная степень деформации Λ_p при кручении проволоки диаметром 1,8 мм из стали 70

α_p, °	Λ_p	α_p, °	Λ_p
при $t_{исп}$ = 20 °С		при $t_{исп}$ = –55 °С	
61,4	1,83	59,7	1,71
63,9	2,04	53,0	1,33
62,0	1,88	58,9	1,66
57,6	1,58	56,3	1,50
50,6	1,23	53,7	1,36
58,5	1,63	56,8	1,53
$\alpha_{ср}$ = 59,0°	$\Lambda_{ср}$ = 1,66	$\alpha_{ср}$ = 56,5°	$\Lambda_{ср}$ = 1,51

Для определения степени деформации при кручении использовали методику исследования В.Л. Колмогорова (Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.). До испытания типографским способом наносили риску вдоль образующей поверхности образца. При кручении риска поворачивается и получает форму винтовой линии. В месте разрушения риска имеет наклон к оси образца, характеризуемый углом α_p, а предельная степень деформации металла образца равна:

$$\Lambda_p = \mathrm{tg}\alpha_p.$$

В табл. 4 приведены результаты замера угла наклона риски в месте разрушения образцов проволоки диаметром 1,8 мм из стали 70, протянутой из заготовки диаметром 2,9 мм (Q = 61,5 %).

Расчетное значение критерия Стьюдента для значений угла α_p (см. табл. 4) составляет 0,270, а табличное значение при 5%-ном уровне значимости — 2,228, что свидетельствует о несущественном различии средних значений угла α_p для образцов, разрушенных при +20 и –55 °С.

Испытания на скручивание показали значительную неравномерность распределения деформации вдоль длины образца, особенно при отрицательной температуре. Анализ результатов испытаний образцов проволоки при кручении образцов из разных марок сталей с различной степенью деформации позволил выявить общую картину распределения степени деформации вдоль оси образцов, представленную на рис. 2.

Степень деформации сдвига при обеих температурах испытания значительно уменьшается на коротком участке в направлении от места разрушения образцов. Но длиннее участок интенсивного снижения деформации при отрицательной температуре. Поэтому значительно больше число скручиваний образцов до разрушения при положительной температуре, несмотря на незначительное различие предельной степени деформации сдвига в месте разрушения при разных температурах испытания (см. табл. 4).

Данные рис. 2 показывают положительное влияние деформации при волочении на сниже-

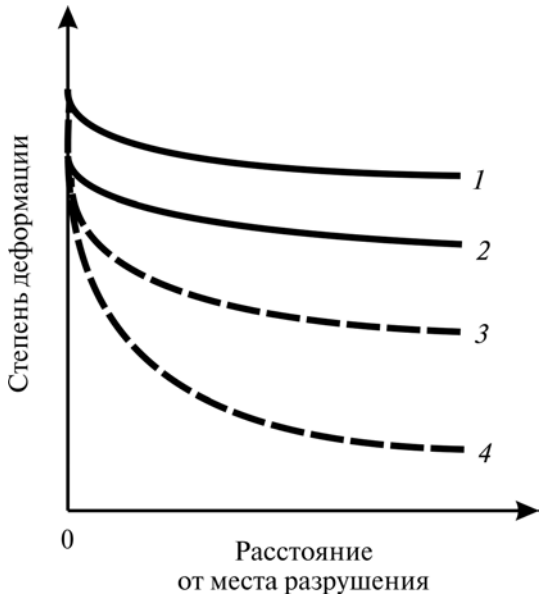


Рис. 2. Характер распределения степени деформации по длине образцов в момент их разрушения при кручении: *1, 2* — +20 °С; *3, 4* — –55 °С; *1, 4* — Q_1; *2, 3* — Q_2; $Q_2 > Q_1$

ние пластичности под действием низкой температуры. Увеличение деформации проволоки приводит также к более равномерному распределению степени деформации сдвига по длине образца. В результате указанного действия образцы с большей степенью деформации проволоки при волочении Q_2 имеют более высокую деформацию сдвига, чем образцы с меньшей деформацией Q_1 на некотором удалении от места разрушения. Это привело к увеличению числа скручиваний образцов при отрицательной температуре с повышением степени деформации холодного волочения (см. табл. 3).

В работе В.Н. Гриднева, В.Г. Гаврилюка, Ю.Я. Мешкова (Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. Киев: Наук. думка, 1974. 231 с.) отмечено, что со снижением температуры испытания число перегибов проволоки до разрушения уменьшается в меньшей степени, чем количество скручиваний. Это объясняется тем, что "*число скручиваний наиболее чувствительно к наличию в проволоке микротрещин*". Проведенные испытания позволяют дополнить: уменьшение числа скручиваний при отрицательной температуре связано с усилением неоднородности деформации кручения по длине образца. Деформация при кручении особенно к моменту локализуется перед разрушением на меньшей длине участка образца, чем при положительной температуре деформирования.

Удельная работа ударного среза проволочных образцов без нанесения концентраторов напряжения увеличилась в 1,5—2,0 раза с понижением температуры испытания с +24 до –70 °С. Для испытаний канатов на выносливость была спроектирована и изготовлена на экспериментальном заводе НИИметиз пробежная машина горизонтального типа, отличающаяся удобством эксплуатации в условиях стандартной низкотемпературной камеры.

Опытно-промышленные партии проволоки и канатов изготовлены в соответствии с разработанными техническими условиями ТУ 14-4-1542—89 "Проволока стальная канатная специальная" и ТУ 14-4-1589—89 "Канаты стальные для башенных кранов". В технических условиях показатели качества проволоки не ниже соответствующих показателей зарубежных аналогов и превосходят показатели канатной проволоки по ГОСТ 7372—79 в части требований на число скручиваний до разрушения и расширения сортамента проволоки маркировочной группой 2060 МПа (210 кгс/мм^2).

В соответствии с техническими условиями на проволоку составлена технологическая инструкция ВТИ 174-МТ-Пр-122-89 "Проволока стальная, углеродистая для канатов в северном исполнении". Эффективность применения разработанных канатов с хладостойкой смазкой Торсиол-55 заключается в повышении уровня их наработки при положительной температуре и его сохранении при отрицательных температурах до –60 °С, снижением затрат на монтаж и демонтаж канатов, а также в уменьшении диаметра канатов на 10...15 % за счет повышения уровня прочности проволоки до 2060 МПа.

Заключение. Разработаны методики для нестандартных испытаний проволоки и канатов при отрицательных температурах и изготовлены соответствующие устройства и приспособления для их реализации. Проведены испытания проволоки из различных марок углеродистой стали при положительных и отрицательных температурах на разрыв растяжением, кручение, ударный срез и усталостную стойкость.

Испытания канатов диаметром 7,2 мм маркировочных групп прочности 1770 и 2060 МПа из стали 70 (ТУ 14-15-113—82) с хладостойкой смазкой Торсиол-55 показали отсутствие снижения выносливости при уменьшении температуры с +20 до –60 °С.

На основе проведенных исследований выбраны конструкция канатов (двойной свивки типа ЛК — РО 6 × 36 + о.с. ГОСТ 7668—80), канатная смазка, марки стали проволоки, уровень ее прочностных свойств, допуски на диаметр, предельные значения числа скручиваний и гибов до ее разрушения.

Разработана и утверждена техническая и технологическая документация на производство проволоки и канатов в северном исполнении. Статистическая обработка результатов механических испытаний канадской проволоки и проволоки отечественных канатов общего назначения при обычных и отрицательных температурах показала необходимость использования качественной стали и совершенствования процесса волочения канатной проволоки для повышения по ее длине однородности физико-механических свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гурьянов Г.Н., Баталов Г.В., Киселев В.Я.** Результаты исследования прочностных и пластических свойств при низкотемпературном растяжении и кручении углеродистой проволоки // Металлургическая и горно-рудная промышленность. 2007. № 6. С. 59—62.
2. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Методики и результаты испытания углеродистой проволоки на ударный срез и растяжение при низкой температуре // Качество в обработке материалов. 2014. № 1. С. 64—70.
3. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Температура волочения как определяющий фактор управления качеством проволоки ответственного назначения // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. проф. М.В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. Вып. 38. С. 89—102.
4. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Качество и технологичность волочения проволоки специального назначения // Сталь. 2013. № 3. С. 78—80.

Геннадий Николаевич Гурьянов, канд. техн. наук;
Борис Михайлович Зуев,
zuev_bm@mail.ru;
Владимир Дмитриевич Егоров, канд. техн. наук

ООО "Издательство Машиностроение" продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4
тел.: (499) 269-5298, факс: (499) 269-4897,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 621.791.722:621.762.04

Ю.А. Соколов *(ООО "НТК Электромеханика", г. Ржев),*
С.Ю. Кондратьев, А.А. Лукьянов
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств

Показана перспективность промышленного использования технологии синтеза электронным лучом для получения деталей из композиционных материалов. Установлено, что технология синтеза электронным лучом обеспечивает получение однородного композиционного материала. Исследованы механические свойства композиционных сплавов титана, полученных методом электронно-лучевого синтеза. Изучена возможность повышения износостойкости таких сплавов путем нанесения поверхностных покрытий из молибдена.

Ключевые слова: композиционные материалы; порошковая металлургия; электронно-лучевой синтез; механические свойства; конструкционные материалы.

Prospects of industrial use of the technology of electronic beam synthesis for producing of materials of different function are shown. It is established that the technology of synthesis by electronic beam provides uniform composite material. Mechanical properties of the composite alloys of the titan produced by method of electronic beam synthesis are investigated. Possibility for increase of wear resistance of such alloys by drawing of superficial coverings from molybdenum is studied.

Keywords: composite materials; powder metallurgy; electronic beam synthesis; mechanical properties; structural materials.

Несмотря на широкое применение порошковой металлургии в современной промышленности, работы по созданию новых технологий получения таких материалов остаются актуальными [1—7]. Новые возможности по получению изделий из порошка различного химического состава с программируемой структурой открывают метод *синтеза изделий электронным лучом* (СИЭЛ) [8, 9], а также возможность формирования на поверхности таких деталей поверхностных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами [10, 11].

Технология СИЭЛ включает в себя следующие операции:

- формирование гранул из различных металлов и сплавов, в том числе тугоплавких химически активных металлов;
- послойный синтез изделий из порошка (гранул) с помощью электронного луча, плазменного, магнетронного или электронно-лучевого напыления и других методов;
- высокотемпературную газостатическую обработку (при необходимости).

Все этапы изготовления характеризуются особенностями физико-химических процессов, протекающих в материале, и технологическими сложностями.

Следует отметить преимущества процесса синтеза изделий с помощью электронного луча по сравнению с другими традиционными промышленными технологиями:

— безокислительная среда для синтеза химически активных материалов;

— возможность синтеза тугоплавких металлов и сплавов;

— дополнительная очистка гранул в процессе обработки;

— объемный источник тепла вследствие пробега электронов вглубь гранул;

— малый диаметр луча в месте его встречи с подложкой;

— высокая удельная поверхностная плотность луча;

— периодический характер приложения тепловой нагрузки к каждой точке поверхности подложки;

— наличие жидкого проводящего слоя в электромагнитном поле вследствие воздействия электронного луча;

— зависимость тока фокусировки луча от угла его отклонения (для электронных пушек без преломления луча).

Вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения (до 10^5 °С/с) формируется структура сплава с мелким зерном. Известна следующая зависимость расстояния между дендритными ветвями второго порядка d от скорости охлаждения [12]:

$$d = a / \mathrm{v}_{\text{охл}}^{n}, \qquad (1)$$

где a, n — постоянные; $\mathrm{v}_{\text{охл}}^{n}$ — скорость охлаждения.

Скорость зарождения кристаллов возрастает с ростом скорости охлаждения, что приводит к пропорциональному уменьшению размера зерен.

Управление свойствами композиционных материалов может осуществляться также путем комбинирования режимов синтеза изделий и термической обработки. Технология СИЭЛ позволяет проводить термическую обработку не только поверхностного слоя готового изделия, но и в процессе его "роста" (изготовления), формируя за счет этого программируемую структуру.

В связи с тем, что любые композиционные материалы имеют пористую структуру, их свойства могут быть хуже по сравнению с компактным материалом. Для того чтобы технология синтеза электронным лучом была конкурентоспособной традиционным методам получения изделий из компактного материала, необходимо чтобы свойства деталей, полученных по технологии СИЭЛ, удовлетворяли или превышали требования, предъявляемые к компактным материалам. Однако детали, полученные по технологии синтеза с помощью электронного луча, могут иметь свойства, отличающиеся от свойств компактного материала. Поэтому оценка однородности и уровня механических свойств материалов, полученных методом СИЭЛ, является важным вопросом.

Цель работы — исследование механических свойств порошкового и композиционного титановых сплавов ВТ6, полученных методом послойного электронно-лучевого синтеза, а также оценка возможности нанесения на изделия из них износостойких молибденовых покрытий.

Методика проведения исследований. Для оценки механических свойств изделий, полученных методом электронно-лучевого синтеза, исследовали порошковый титановый сплав ВТ6 (Ti—6Al—4V), стандартный химический состав которого приведен в табл. 1.

Сплав ВТ6 применяют для изготовления крупногабаритных сварных и сборных конструкций летательных аппаратов, баллонов, работающих под внутренним давлением в широком интервале температур, и других ответственных изделий.

Требования по различным ГОСТам к механическим свойствам компактного сплава ВТ6 представлены в табл. 2.

Заготовки для исследований размерами 10×70×3 мм синтезировали из гранул сплава ВТ6 методом послойного электронно-лучевого синтеза по режиму: скорость перемещения луча 4530 мм/с; ток луча 19 мА; ускоряющее напряжение 60 кВ; давление в рабочей камере $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Результаты исследований и их обсуждение. Метод СИЭЛ осуществляет послойный синтез материала из сплава в виде порошка (гранул). В связи с

1. Стандартный химический состав сплава ВТ6 по ГОСТ 19807—91

Содержание основных химических элементов, % мас.									
Ti	Al	V	Fe	C	Si	Zr	N	O	H
Основа	5,3...6,8	3,5...5,3	< 0,3	< 0,1	< 0,15	< 0,3	< 0,05	< 0,2	< 0,015

2. Стандартные требования к механическим свойствам компактного сплава ВТ6

Вид изделия	ГОСТ	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Удлинение δ, %	Сужение в шейке ψ, %	*KC*U, Дж/см^2
Лист, отожженный	22178—76	885	8	—	—
Пруток, отожженный, повышенное качество	26492—85	835...1050	6...10	20...30	30...40
Пруток после закалки и старения		1080	4	12	20
Пруток, отожженный		835...885	6...8	15...20	25
Пруток после закалки и старения, повышенное качество		1080	6	20	25...30
Плита отоженная	23755—79	835...1080	6	12...16	30
	Твердость, HV10				
Пруток после закалки и отпуска	310...382				
Штамповка после отжига	266...363				

3. Результаты измерения твердости, HV10, образца порошкового сплава ВТ6

Горизонтальная ось						Вертикальная ось			
Номер точки по рис. 1									
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
348	335	328	351	331	343	332	333	326	329
7	8	9	10	11	12	5	6	7	
354	348	327	344	348	346	335	355	337	

этим можно ожидать значительную неравномерность свойств по слоям полученного изделия. Для выявления неоднородности свойств материала применяли метод послойного измерения твердости [13].

Твердость синтезированного композиционного образца сплава ВТ6 измеряли по шкале Виккерса на универсальном твердомере Zwick// Roell ZHU. Схема измерения твердости показана на рис. 1, а результаты измерения приведены в табл. 3.

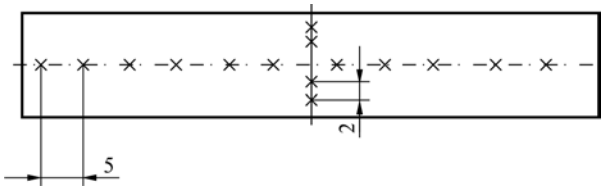


Рис. 1. Схема измерения твердости HV10 порошкового образца сплава ВТ6 (расстояние между замерами указано в мм)

Из полученных экспериментальных результатов (см. табл. 3) следует, что твердость по всем слоям исследованных образцов как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях имеет незначительный разброс и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к компактному титановому сплаву ВТ6 (см. табл. 2).

Механические свойства порошкового материала ВТ6 определяли согласно ГОСТ 1497—84 с использованием универсальной испытательной машины Zwick//Roell Z100 с максимальной силой 100 кН. Для испытания из заготовки композиционного сплава ВТ6 изготовляли пятикратные плоские образцы: тип II, № 22 по ГОСТ 1497—84. Определяли следующие характеристики: условный предел текучести $\sigma_{0,2}$; предел прочности $\sigma_в$; относительное удлинение после разрыва δ. Относительное остаточное сужение в шейке после разрыва согласно ГОСТ 1497—84 на плоских образ-

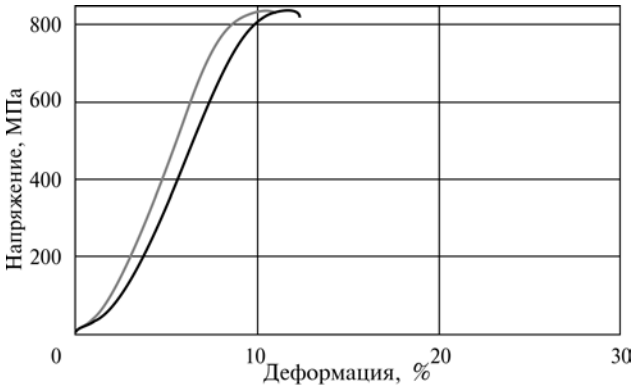


Рис. 2. Диаграммы растяжения двух различных образцов, полученных методом послойного электронно-лучевого синтеза из гранул титанового сплава ВТ6

цах не определяют. Полученные при испытаниях диаграммы растяжения представлены на рис. 2, а механические свойства сплава — в табл. 4.

Испытания на ударную вязкость проводили по ГОСТ 9454—78 с использованием маятникового копра Zwick//Roell RKP 450 с максимальной запасенной энергией 450 Дж. Для испытания из заготовок порошкового сплава ВТ6 изготовляли образцы: тип I по ГОСТ 9454—78. Результаты испытания приведены в табл. 5.

Результаты испытаний (см. табл. 4 и 5) показали, что образцы, полученные методом послойного электронно-лучевого синтеза из гранул титанового сплава ВТ6, по механическим свойствам удовлетворяют требованиям, предъявляемым к компактным изделиям из отожженного титанового сплава ВТ6 (см. табл. 2). Это свидетельствует о перспективности применения технологии СИЭЛ для изготовления деталей ответственного назначения из конструкционных сплавов.

4. Механические свойства порошкового сплава ВТ6 при испытаниях на статическое растяжение

Номер образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_р$, МПа	δ, %
1	750	838	827	1,8
2	750	836	814	2,7
3	760	838	830	2,5

5. Ударная вязкость порошкового сплава ВТ6 при испытаниях на ударный изгиб

*KC*U, Дж/см^2
42,5
43,5
43,3

Для обеспечения защиты деталей авиационной и ракетной промышленности и получения необходимых механических и теплофизических свойств целесообразно формировать на их поверхности слои из гранул молибдена. В частности, молибденовые покрытия отличаются высокой твердостью (400...900 HV), износостойкостью, стойкостью к абразивному воздействию и эрозии, а также имеют высокие антизадирные свойства.

Технология электронно-лучевого синтеза композиционного материала из гранул заданного состава позволяет получать материал, состоящий из гранул основного металла, например, титана и тугоплавкого молибдена, послойно наносить гранулы молибдена на поверхность изделия из титанового сплава и получать защитный слой требуемой толщины с требуемыми свойствами.

Технологическая схема, представленная на рис. 3, показывает последовательность получения опытного образца из гранул титанового сплава ВТ6 и молибдена с использованием методов послойного синтеза и вакуумной пайки. Операция синтеза гранул молибдена была осуществлена на отечественной электронно-лучевой установке типа "ЭЛУ".

Последовательность получения изделия включала в себя следующие основные технологические операции:

1. Синтез образца из гранул титанового сплава ВТ6 размерами 10×10×15 мм. Режим обработки: скорость перемещения луча 4530 мм/с; ток луча 17 мА; ускоряющее напряжение 60 кВ; давление в рабочей камере $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Па.

2. Нанесение слоя гранул из молибдена (85 % об.) и титана (15 % об.) на переднюю поверхность образца.

3. Спекание слоя из гранул молибдена и титана на поверхности образца из гранул сплава ВТ6. Режим обработки: максимальная температура нагрева 900 °С; давление в рабочей камере $6 \cdot 10^{-3}$ Па.

4. Электронно-лучевая обработка слоя из гранул молибдена и титана (вакуумная пайка молибдена и титана). Режим обработки: скорость перемещения луча 3200 мм/с; ток луча 22 мА; уско-

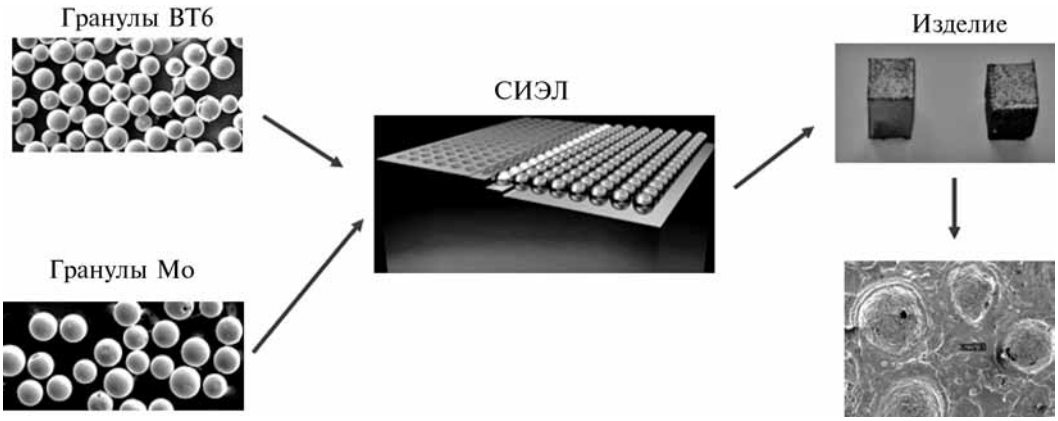


Рис. 3. Технологическая схема получения образцов из гранул титанового сплава ВТ6 и молибдена на базе методов послойного синтеза и пайки

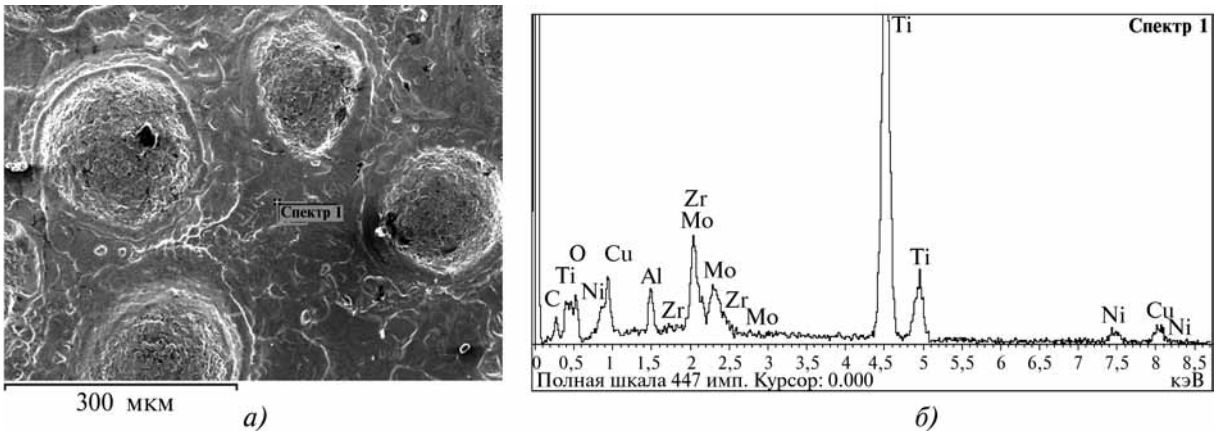


Рис. 4. Электронное изображение поверхности композиционного материала из титанового сплава ВТ6 и молибдена (*а*) и его химический состав в заданной точке — спектр 1 (*б*)

ряющее напряжение 60 кВ; давление в рабочей камере $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

При проведении локального химического анализа полученного образца использовали энергодисперсионный спектрометр INCA Energy++ фирмы Oxford Instruments. Химический состав в заданной точке гранульного композиционного материала приведен на рис. 4.

Получение образцов титанового сплава ВТ6 с последующим нанесением на их поверхность молибденового покрытия показано на рис. 5. Для получения образцов применяли методы послойного электронно-лучевого синтеза и плазменного нанесения порошковых покрытий. На первом этапе методом послойного электронно-лучевого синтеза изготовляли образцы из гранул титанового сплава ВТ6. На втором этапе на образцы наносили слой из гранул молибдена методом газоплазменного напыления.

Последовательность получения готового изделия включала в себя следующие основные технологические операции:

1. Синтез образца из гранул титанового сплава ВТ6 размерами 10×10×15 мм. Режим обработки: скорость перемещения луча 4530 мм/с; ток луча 17 мА; ускоряющее напряжение 60 кВ; давление в рабочей камере $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Па.

2. Плазменное напыление слоя гранул из молибдена (100 % об.) на переднюю поверхность образца. Режим обработки: ток напыления 550 А; среда — аргон.

С помощью гранул тугоплавких металлов можно получать особо стойкие покрытия на основе оксидов, карбидов, нитридов, а также создавать

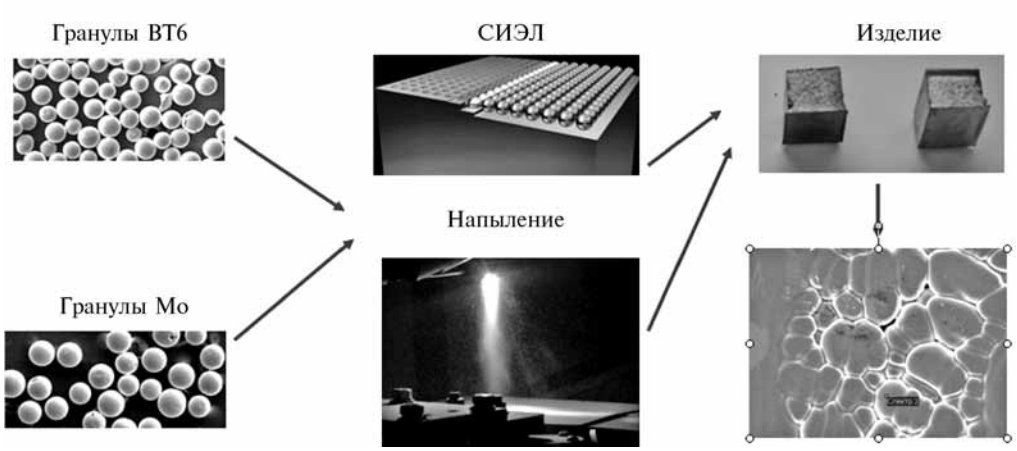


Рис. 5. Технологическая схема получения образцов из гранул титанового сплава ВТ6 на базе методов послойного синтеза и пайки

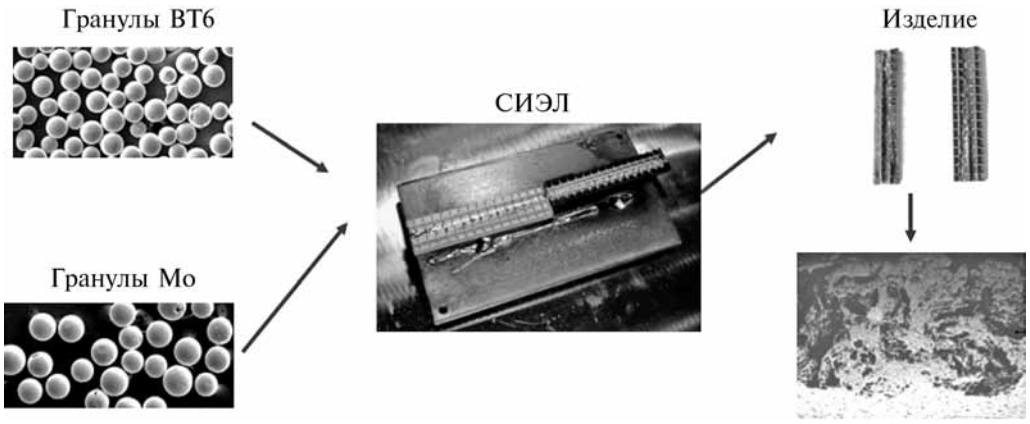


Рис. 6. Технологическая схема получения образцов из гранул титанового сплава ВТ6 и оксида молибдена на базе метода послойного электронно-лучевого синтеза

композиционные матрицы и получать материалы с заранее заданными характеристиками. Иллюстрация реализации данного подхода приведена на рис. 6, на котором показан процесс синтеза слоя оксида молибдена на образец, полученный методом электронно-лучевого синтеза из гранул титанового сплава ВТ6.

Для получения готовых изделий по такой технологии использовали следующие основные операции:

1. Синтез образца из гранул титанового сплава ВТ6 размерами 10×70×3 мм. Режим обработки: скорость перемещения луча 4530 мм/с; ток луча 19 мА; ускоряющее напряжение 60 кВ; давление в рабочей камере $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Па.

2. Спекание слоя гранул в среде кислорода.

3. Электронно-лучевая обработка слоя гранул из оксида молибдена. Режим обработки: скорость перемещения луча 900 мм/с; ток луча 14 мА; ускоряющее напряжение 60 кВ; давление в рабочей камере $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ Па.

Все три использованные схемы получения композиционного титанового сплава ВТ6 с защитным молибденовым слоем на поверхности показали эффективность применяемых технологий и позволили получить рабочий материал с повышенной твердостью и износостойкостью поверхности.

Выводы

1. Метод синтеза изделий электронным лучом позволяет создавать композиционные материалы

с программируемой структурой из гранул требуемой формы и размеров различного химического состава, включая гранулы химически активных материалов, что обеспечивает получение заданных эксплуатационных свойств деталей и оборудования.

2. Метод послойного электронно-лучевого синтеза позволяет получать порошковые материалы с однородной структурой и свойствами по сечению изделия, а также формировать на их поверхности функциональные покрытия заданной толщины.

3. Механические свойства титанового сплава ВТ6, полученного методом синтеза электронным лучом, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к компактным изделиям из этого материала.

4. Технология синтеза электронным лучом является перспективной для получения композиционных материалов из различных, в том числе тугоплавких, металлов и нанесения на них различных покрытий, а также для комбинированных технологий, сочетающих различные методы изготовления и обработки готовых деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. В 2 т. Т. 1. Производство металлических порошков. М.: Изд-во МИСИС, 2001. 368 с.
2. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. В 2 т. Т. 2. Формование и спекание. М.: Изд-во МИСИС, 2002. 320 с.
3. **Герман Рендалл М.** Порошковая металлургия от А до Я. Учебно-справочное руководство / Пер. с англ. О.В. Падалко и Г.А. Либенсон. М.: ИД Интеллект, 2009. 336 с.
4. **Теория** и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа / В.Н. Кокорин, А.И. Рудской, В.И. Филимонов, Е.М. Булыжев, С.Ю. Кондратьев. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
5. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 6. С. 12—16.
6. **Прессование** гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения / А.И. Рудской, В.Н. Кокорин, С.Ю. Кондратьев, В.И. Филимонов, А.В. Кокорин // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13—20.
7. **Исследование** процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду / А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148—155.
8. **Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A. et al.** Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // Acta Materialia. 2010. № 58. P. 1887—1894.
9. **Biamino S., Penna A.U., Ackelid U. et al.** Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation // Intermetallics. 2011. № 19. P. 776—781.
10. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. August 2012. V. 26. № 8. P. 629—632.
11. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11—15.
12. **Characterization** and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti—6Al—4V powder fractions / J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa // Journal of Materials Processing Technology. 2013. Vol. 213. P. 2109—2118.
13. **Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. 128 с.

Юрий Алексеевич Соколов, канд. техн. наук;
Сергей Юрьевич Кондратьев, д-р техн. наук,
petroprom2013@yandex.ru;
Алексей Александрович Лукьянов, канд. техн. наук

УДК 669-419

Ю.В. Гребнев, В.Ф. Жаркова
(Волгоградский государственный технический университет)

Исследование композиционного металлического материала XIX в.

Исследован лемех плуга, изготовленный методом свободной ковки из металлов, различных по химическому составу. Установлено, что более века назад российские металлурги хорошо знали и умели использовать технологические и эксплуатационные свойства высоколегированных сталей.

Ключевые слова: композиционный металлический материал; кузнечная сварка; эффект самозатачивания; износостойкость.

The ploughshare plow is explored. It is made by method of free forging from metals of different chemical composition. It is established that more than centuries ago Russian metallurgists well know and could use the technological and operational properties of stainless steels.

Keywords: composite metal material; forge welding; self-sharpening effect; wear resistance.

В селе Ерзовка Волгоградской области, в месте расположения кузницы был найден лемех конного плуга. В 1901 г. кузница была перевезена в другое место, и на ее территории было построено жилое строение.

Представляло определенный интерес изучить химический состав и структуру изделия, произведенного в конце XIX начале XX в.

Исследуемый лемех эксплуатировался до предельного износа (рис. 1). Рабочая грань лемеха острая, с характерными следами процесса абразивного самозатачивания.

Травление микрошлифов, выполненных в поперечном сечении детали, выявило композиционное строение металла. На основной металл детали с двух сторон наварены полосы металла другого химического состава (рис. 2). Со стороны рабочей поверхности детали слой наваренного металла практически полностью изношен, что и определило эффект самозатачивания композиционного изделия.

Микроструктура основного металла детали — мелкозернистый феррит с незначитель-

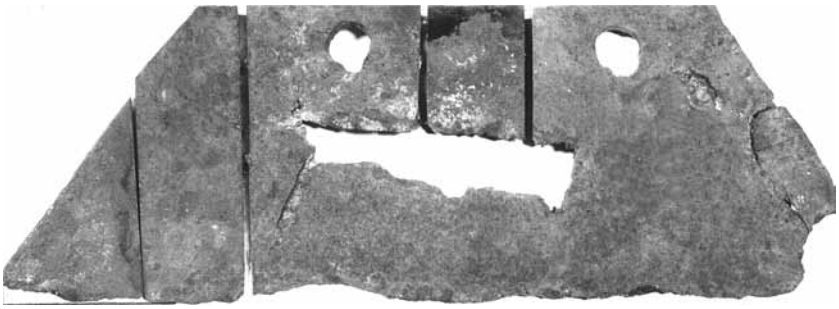


Рис. 1. Общий вид лемеха конного плуга

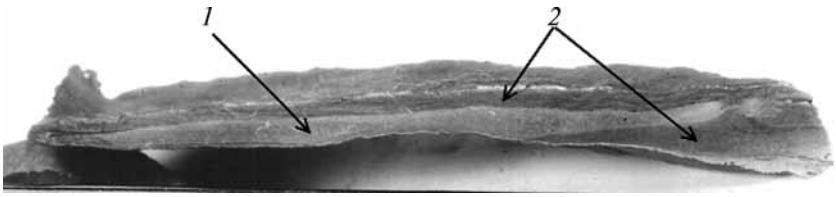
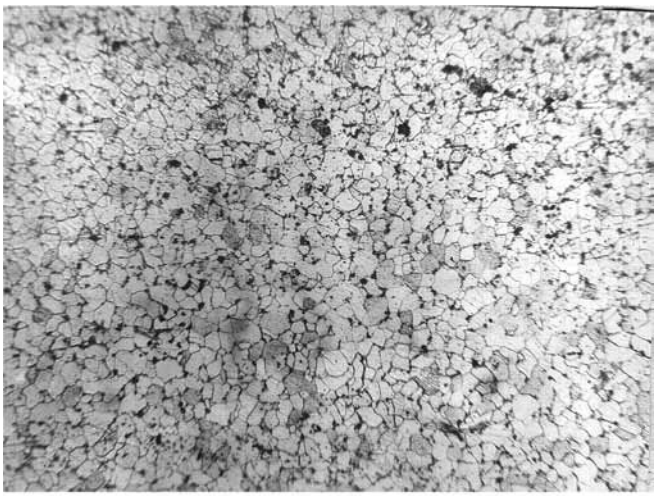
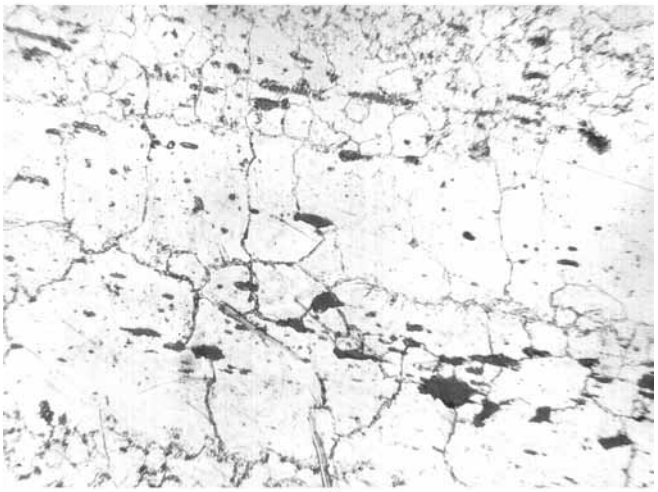


Рис. 2. Макроструктура металла детали лемех:
1 — углеродистая сталь; *2* — высокомарганцевая сталь

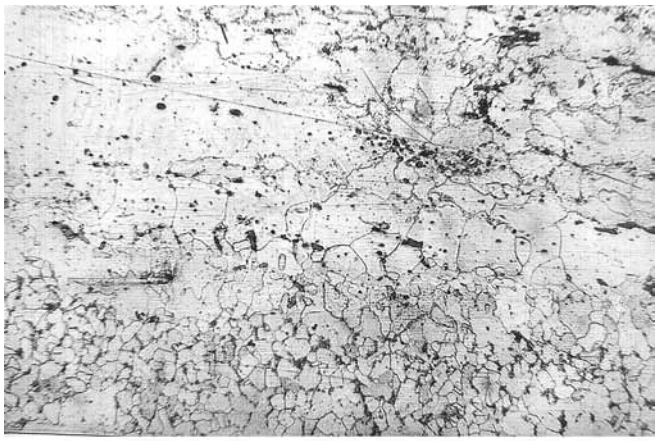


а)



б)

Рис. 3. Микроструктура металла детали лемех (×100):
а — основной металл; *б* — наваренный металл



а)

б)

Рис. 4. Микроструктура металла детали в месте зоны сплавления (×200):
а — отсутствие четкой линии сплавления; *б* — участок металла в зоне сплавления с дефектами

ным количеством перлита (рис. 3, *а*). Наваренные слои металла имеют структуру аустенита с отдельными мелкими карбидами в зернах и по границам зерен (рис. 3, *б*). Линия сплавления двух металлов по сечению детали неоднородна. В основном, это участки с плотной, бездефектной структурой (рис. 4, *а*). В отдельных местах по границе сплавления отмечаются участки с дефектами, заполненными окалиной (рис. 4, *б*).

Твердость металлов детали, измеренная на микротвердомере ПМТ-3, после перевода в единицы шкалы Бринелля составляет:

— основной металл 120...145 НВ;

— наплавленный металл 209...221 НВ.

Химическим анализом определено, что основной металл детали по составу наиболее близок к марке стали 08пс по ГОСТ 1050—88 (см. таблицу) при практическом отсутствии марганца (должно быть 0,35...0,65 % Mn).

Наваренный металл соответствует составу высокомарганцевой стали, запатентованной Р. Гадфильдом в 1882 г. Низкое содержание углерода в исследуемой стали относительно химического состава стали 110Г13Л выбрано, видимо, не

Химический состав исследуемых металлов, % мас.

Металл	C	Mn	Si	Cr	P	S
Основной	0,07	0,03	0,061	0,10	0,013	0,017
Наваренный	0,69	11,04	0,078	0,05	0,021	< 0,01

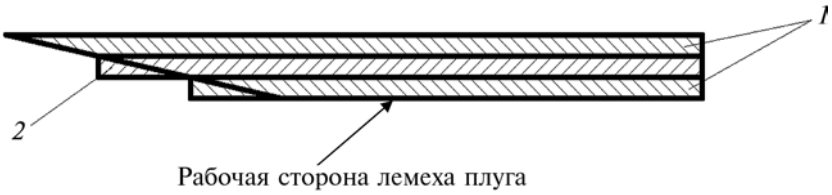


Рис. 5. Конструкция композиционного лемеха плуга:
1 — высокомарганцевая сталь; *2* — низкоуглеродистая сталь

случайно. При таком содержании углерода в высокомарганцевой стали упрощается процесс термической обработки для получения аустенитной структуры с малым количеством карбидов. Сталь с низким содержанием углерода легче подвергается пластической деформации при ковке без образования дефектов. Следует отметить низкое содержание в металле изделия вредных примесей: серы и фосфора. В настоящее время использование в металлургических процессах высокофосфористых руд, сернистого кокса привело к увеличению содержания в металле серы и фосфора практически на порядок.

Конструкция композиционного лемеха плуга отличается от традиционной конструкции самозатачивающихся изделий, в которых на твердую металлическую основу наносится слой мягкого легко истирающегося металла. Кузнец-конструктор в XIX в. учитывал характеристики используемых сталей и все особенности эксплуатации лемеха плуга в условиях обработки суглинистых почв Нижнего Поволжья. Поэтому высокопрочный вязкий и износостойкий слой высокомарганцевой стали располагался по всей поверхности изделия, придавая ему прочность в местах наибольших изгибающих нагрузок, высокую износостойкость и способность к самозатачиванию (рис. 5).

Таким образом, уже через 18—19 лет после патентования российские металлурги эффективно использовали сталь Гадфильда для создания износостойких, высоконадежных самозатачивающихся композиционных почвообрабатывающих инструментов.

Юрий Владимирович Гребнев, канд. техн. наук;
Вера Федоровна Жаркова,
mitlp@vstu.ru

Специалистам в области обработки металлов концентрированными потоками энергии

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

"ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА И СМЕЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

17—20 ноября 2015 г. **г. Москва**

С 17 по 20 ноября 2015 г. на базе Национального исследовательского университета "МЭИ" проводится **Международная конференция "Электронно-лучевая сварка и смежные технологии"**

Тематика конференции:

- Физические процессы при обработке концентрированными потоками энергии
- Технологии обработки электронным лучом
- Оборудование для обработки электронным лучом
- Сварочное материаловедение, прочность, контроль и диагностика сварных соединений

Контакты: e-mail: OvechnikovSA@mpei.ru, тел. +7 (495) 362 71 18

Секретарь конференции Сергей Александрович Овечников

УДК 621.791:338.45

Е.В. Алпеева, И.Н. Родионова, А.А. Котельников
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)

Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчета сварных конструкций методом конечных элементов

Представлена методика проведения функционально-стоимостного анализа эффективности программ (NX, КОМПАС-3D, CATIA, SolidWorks) для расчета сварной двутавровой балки методом конечных элементов.

Ключевые слова: функционально-стоимостной анализ; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние.

The method of functional and cost analysis for determination of efficiency of programs (NX, KOMPAS-3D, CATIA, SolidWorks) for calculation of welded flange beam by finite element method is presented.

Keywords: functional and cost analysis; finite element method; strain-stress state.

Вопросы обоснования экономической эффективности конструкторских решений являются важной частью менеджмента конструкторских отделов машиностроительных предприятий. Показатель экономической эффективности является одним из критериев оптимальности разрабатываемых конструкций, позволяющим оценить качество предлагаемого инженерного решения.

Для анализа экономической эффективности широко применяют метод функционально-стоимостного анализа (ФСА). Известно, что он состоит из пяти этапов: подготовительного, информационного, аналитического, творческого и исследовательского.

На подготовительном этапе выбирают объект проведения анализа и устанавливают приоритетность показателей анализируемого объекта.

Информационный этап предполагает сбор и систематизацию данных о предмете функционально-стоимостного анализа. Этими данными могут быть: себестоимость, трудоемкость, материалоемкость составных частей изделия, а именно сборочных единиц (узлов, агрегатов, систем) и отдельных деталей; конструкторско-технологическая документация; технико-экономические данные по покупным частям изделия; информация о претензиях потребителей к качеству отдельных деталей и сборочных единиц; данные об отказах изделия с мест эксплуатации и т.д. Аналитическая работа с подобранной технико-экономической информацией на данном этапе позволяет найти наиболее эффективные направления функционально-стоимостного анализа выбранного изделия.

Основной задачей аналитического этапа является выявление зоны максимальной концентрации резервов снижения себестоимости с тем, чтобы на последующих этапах разработать и использовать конструкторско-технологические направления для снижения затрат.

Главная задача творческого этапа — выработка вариантов конструкторско-технологических решений, позволяющих снизить стоимость выполняемых функций, прежде всего тех, по которым выявлен дисбаланс на предшествующем этапе.

На исследовательском этапе проводят технико-экономическую оценку вариантов конструкторско-технологических решений, предложенных на творческом этапе: устанавливают их техническую осуществимость, соответствие техническим требованиям, предъявляемым к конструкции изделия при его эксплуатации [1].

В качестве примера использования метода функционально-стоимостного анализа сравним

четыре программы, которые использовали для анализа напряженно-деформированного состояния сварной двутавровой балки.

Расчет стрелы прогиба проводили в четырех программах: *NX* (решатель *NX Nastran*), КОМПАС-3*D* (решатель *APM FEM*), *CATIA* (решатель *MSC.SimDesigner*), *SolidWorks* (решатель *SimulationXpress*).

Максимальные значения прогиба, полученные в результате конечно-элементного анализа, приведены в таблице. Допустимая стрела прогиба, вычисленная методом сопротивления материалов, составила 14 мм.

Значения стрелы прогиба

Нагрузка, кН/м	Максимальные перемещения, мм			
	NX	КОМПАС-3*D*	*CATIA*	*SolidWorks*
38	6,943	7,059	4,946	3,981
40	7,308	7,431	5,168	4,192
50	9,135	9,288	6,516	5,240

Стрела прогиба при анализе методом конечных элементов во всех четырех программах при трех значениях нагрузки была меньше допустимой величины, рассчитанной методом сопротивления материалов.

Результаты, полученные в программах *NX* и КОМПАС-3*D*, примерно одинаковые и по сравнению с результатами расчета методом сопротивления материалов на 30 % меньше. Разница между расчетными значениями и значениями анализа в *CATIA* составила 60 %. Значения стрелы прогиба в *SolidWorks* на 70 % меньше расчетных, но их стоит считать некорректными, поскольку в данной программе возможен только один тип закрепления деталей — жесткая заделка [2].

Каждая из этих программ обладает определенными преимуществами в анализе моделей различных изделий. С помощью ФСА можно сравнить эти программы и выбрать наиболее подходящую для анализа определенного изделия.

На подготовительном этапе выявляют показатели, по которым будут осуществлять оценку эффективности:

1) стоимость программного обеспечения (ПО);

2) достоверность результатов анализа программой;

3) возможность импортирования моделей из других программ;

4) параметры конечно-элементной сетки, закрепления и нагрузки;

5) выбор решателя (т.е. универсальность программы);

6) возможность расчета сварных швов.

На втором этапе по каждому показателю собирают следующую информацию:

1. Стоимость ПО узнают у фирмы-разработчика, она зависит в большинстве случаев от количества компьютеров, на которых программа будет установлена, а следовательно, от величины предприятия и его конструкторского отдела.

2. Достоверность результатов анализа определить очень трудно. Будем предполагать, что более достоверны такие результаты конечно-элементного анализа, которые ближе к результатам расчета методом сопротивления материалов.

3. Возможность импортирования моделей из других программ выявляют по списку расширений, который предлагает программа при сохранении файлов. В рассматриваемом примере все программы имеют большой список расширений, но более качественное импортирование происходит между программами: *NX* и *CATIA*, КОМПАС-3*D* и *SolidWorks*.

4. Чем больше выбор параметров конечно-элементной сетки, закрепления и нагрузок, тем более точные результаты будут получены. Каждую программу следует анализировать в отдельности по каждому из перечисленных показателей, однако для упрощения рассмотрим их совместно. В порядке убывания количества параметров всех трех показателей: *CATIA*, *NX*, КОМПАС-3*D*, *SolidWorks*.

5. Выбор решателя — относительно незначительный параметр и в приведенном примере присутствует только у программы *NX*. Эта функция упрощает расчеты и при наличии одной программы позволяет провести расчеты в нескольких для сравнения результатов.

6. При расчете сварных конструкций важна возможность включения в анализ сварных швов. В рассматриваемом случае такой функцией обладают программы *NX* и *CATIA*.

На аналитическом этапе анализируют важность параметров. В порядке убывания значимость параметров с точки зрения эффективности работы программы:

1) достоверность результатов анализа;

2) возможность расчета сварных швов;

3) параметры конечно-элементной сетки, закрепления и нагрузки;

4) выбор решателя;

5) возможность импортирования моделей;

Стоимость ПО не вошла в данный список, поскольку не влияет на работу программы.

На следующем этапе анализируют экономическую эффективность параметров. Приблизительный убывающий порядок значимости:

1) стоимость ПО;

2) достоверность результатов анализа;

3) выбор решателя;

4) возможность импортирования моделей.

Возможность расчета сварных швов и параметры конечно-элементной сетки, закрепления и нагрузки не влияют непосредственно на экономическую эффективность, поэтому на данном этапе не учитывают.

В заключение сопоставляют списки, полученные на предыдущих двух этапах, и по информации второго этапа выбирают программу, наиболее эффективную в функциональном и экономическом плане.

Таким образом, составленный алгоритм позволяет определить наиболее эффективный выбор программы для конечно-элементного анализа сварных конструкций с точки зрения экономической эффективности и рациональности, точности расчета, максимального его приближения к результатам реального нагружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Скворцов Ю.В.** Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Студент, 2012. 374 с.

2. **Котельников А.А., Алпеева Е.В.** Применение метода конечных элементов при расчете сварной двутавровой балки // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технология. 2013. № 2. Ч. 2.

Елена Васильевна Алпеева,
e.v.alpeeva@mail.ru;
Ирина Николаевна Родионова, канд. техн. наук;
Анатолий Александрович Котельников, канд. техн. наук

ООО "Издательство **Машиностроение"**, 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 11.12.2014. Подписано в печать 11.02.2015. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием Справочник (в 2-х томах)

Под общей редакцией А.Г. Суслова

2014 г. Объем 928 с. Формат 60x88 1/16

Переплет ISBN 978-5-94275-709-0

Цена 3000 р.

Том 1. Приведены общие положения отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием и статические методы ОУО ППД: накатывание, вибронакатывание, алмазное выглаживание, дорнование и калибрование.

Последняя глава посвящена ОУО ППД деталей с закономерным изменением качества поверхностного слоя.

Том 2. Приведены динамические и комбинированные методы отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Одна из глав посвящена формообразованию резьб пластическим деформированием, отделочно-упрочняющей и комбинированной обработке резьбовых поверхностей и технологии гладко-резьбовых соединений.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, преподавателей, студентов и аспирантов технических вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

По факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефону: (499) 269-52-98 или на сайте WWW.MASHIN.RU