

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

- Иванина Е.С., Монастырский В.П. Применение критерия Ниямы для прогноза пористости фасонных отливок 531
Васильев П.А., Христов О.В., Данилов П.Г., Калинин А.Г., Осанов В.Н.,
Васильев И.П., Григорьев В.С. Машина фрикционной сварки "Малахит" 537

Кузнечно-штамповочное производство

- Ларин С.Н., Платонов В.И., Романов П.В. Экспериментальное исследование силовых режимов совмещенного процесса обжима с утонением 545
Мартюгин А.В., Володин И.М. Применение нейросетей для совершенствования технологии штамповки поковок коленчатых валов для обеспечения их балансируемости 549

Прокатно-волочильное производство

- Филатов А.А., Соколова О.В., Лагошина Е.В. Повышение качества поверхности прецизионных тонкостенных труб 557

Материаловедение и новые материалы

- Пицък В.С., Дмитриев Э.А., Муравьев В.И., Старцев Е.А. Влияние температуры фазового превращения на эволюцию структуры физического контакта неразъемного соединения титанового сплава ОТ4-1 в образцах "втулка—вал" 560

Информация

- Указатель статей, опубликованных в 2021 г. 570

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

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

Зам. главного
редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
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.
КОБЕРНИК Н.В., д.т.н., доц.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., д.т.н., доц.
КОТЕНКО В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф.
ЛАВРИНЕНКО Ю.А., д.т.н., доц.
ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц.
МОНАСТЫРСКИЙ В.П., д.т.н.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПЛОХИХ А.И., к.т.н., доц.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ОЛУНД Э., Dr. Ir.
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

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

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

За содержание рекламных
материалов ответственность
несет рекламодатель

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

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



Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением; 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности; 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.04 — Литейное производство; 05.16.05 — Обработка металлов давлением; 05.16.06 — Порошковая металлургия и композиционные материалы; 05.16.08 — Нанотехнологии и наноматериалы и в базу данных Chemical Abstracts

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

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

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

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

An advertiser is responsible for
the promotional materials

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

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



CONTENTS

Foundry and Welding Productions

- Ivanina E.S., Monastyrsky V.P. Application of Niyama criterion for predicting of shrinkage porosity of shaped castings531
Vasil'ev P.A., Khristoforov O.V., Danilov P.G., Kalinin A.G., Osanov V.N., Vasil'ev I.P., Grigor'ev V.S. Friction stir welding machine "Malakhit"537

Forging and Stamping Production

- Larin S.N., Platonov V.I., Romanov P.V. Experimental study of force modes for combined reduction and thinning process545
Martyugin A.V., Volodin I.M. Application of neural networks to improve forging technology of crankshaft forgings to ensure their balancibility549

Rolling and Drawing Production

- Filatov A.A., Sokolova O.V., Lagoshina E.V. Improving in surface quality of precision thin-walled pipes557

Physical Metallurgy and New Materials

- Pitsyk V.S., Dmitriev E.A., Murav'ev V.I., Startsev E.A. Effect of phase transformation temperature on evolution of physical contact structure of titanium OT4-1 alloy permanent joints in samples "bushing—shaft"560

Information

- Index of articles published in year 2021570

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.09 — technologies and forming machines; 05.02.10 — welding, related processes and technologies; 05.04.11 — nuclear reactor engineering, machines, units and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 — physical metallurgy and heat treatment of metals and alloys; 05.16.04 — foundry; 05.16.05 — plastic metal forming; 05.16.06 — powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 — nanotechnologies and in Chemical Abstracts database

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



УДК 536.4:621.74.01

DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-12-531-536

Е.С. Иванина, В.П. Монастырский
(Московский политехнический университет)

Применение критерия Ниямы для прогнозирования усадочной пористости фасонных отливок*

Разработана методика определения критического значения критерия Ниямы на основе вычислительного эксперимента. Установлено, что критическое значение критерия Ниямы зависит от условий охлаждения сплава и поэтому применимо только к данному технологическому процессу. Определены критические значения критерия Ниямы для отливок из сплавов МЛ10 и 14Х17Н2Л при литье в постоянные металлические формы и формы из холоднотвердеющих смесей. Полученные результаты подтверждены на фасонной отливке сложной геометрической формы.

Ключевые слова: критерий Ниямы; пористость; компьютерное моделирование; магниевый сплав МЛ10; сталь 14Х17Н2Л; СКМ ЛП "ПолигонСофт".

Method for determining of the critical value of the Niyama criterion based on computational experiment is developed. It is found that the critical value of the Niyama criterion depends on the alloy cooling conditions and therefore is applicable only to the given technological process. The critical values of the Niyama criterion for castings made of ML10 and 14Kh17N2L alloys obtained in permanent metal moulds and in moulds of cold-hardening mixtures are determined. The obtained results are confirmed on shaped casting.

Keywords: Niyama criterion; porosity; computer simulation; magnesium ML10 alloy; 14Kh17N2L steel; SCM FP "PoligonSoft".

Введение. При разработке систем питания отливок с помощью компьютерного моделирования решающее значение имеет прогноз образования усадочной пористости. Помимо прямого моделирования процесса образования пористости часто применяют различные критерии для оценки пористости, в состав которых могут входить теплофизические параметры процесса затвердевания и физические свойства. Наиболее известным является критерий Ниямы [1]:

$$Nu = G/\sqrt{\dot{T}}, \quad (1)$$

где G — градиент температуры; \dot{T} — скорость охлаждения; все значения — вблизи температуры солидуса.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90099/19.

Усадочная пористость возникает там, где значение критерия Ниямы меньше критического. На основе расчета критерия Ниямы можно определить область вероятного образования усадочной пористости в отливке, однако количественная оценка пористости невозможна.

Главная проблема при использовании критерия Ниямы состоит в трудоемкости определения критического значения этого параметра для конкретного сплава и технологического процесса экспериментальным путем.

В работе [1] определено критическое значение Nu для низколегированных сталей. На основе радиографического исследования [2] определены критические значения критерия Ниямы для отливки стальных плит. Критические значения критерия Ниямы для никелевых сплавов и высоколегированных сталей приведены в работе [3], для отливок титанового

сплава Ti—46Al—8Nb, получаемых методом литья в наклонную форму, — в работе [4].

В программе MAGMAsoft [5] основным средством для прогноза усадочных дефектов является критерий Ниямы.

На основе теоретического исследования в работе [6] сделан вывод, что образование пористости зависит и от температурно-временных параметров технологии получения отливки и от геометрии отливки. При кристаллизации переходных сечений условия питания двухфазной зоны вблизи внутреннего и внешнего углов будут разными, так как фронт кристаллизации в первом случае будет выпуклым в сторону жидкой фазы, а во втором — вогнутым. Это объясняет, почему при близких значениях критерия Ниямы в разных частях отливки может наблюдаться различная пористость.

Теоретические выводы работы [6] подтверждаются вычислительными экспериментами. В работах [7, 8] на основе вычислительного эксперимента показано, что зависимость между объемной долей пор и критерием Ниямы является неоднозначной из-за влияния кривизны изотермы солидуса.

Цель работы — разработка методики быстрого определения критических значений критерия Ниямы для различных сталей и сплавов, а также различных технологий получения отливок взамен трудоемкого экспериментального определения этого параметра.

По данной методике с помощью вычислительного эксперимента определены критические значения критерия Ниямы для сплава МЛ10 и жаропрочной стали 14X17H2Л в отливках в виде плиты при литье в кокиль и в форму из холодно-твердеющей смеси (ХТС). Показано,

что полученные критические значения могут быть использованы для прогнозирования пористости в отливках более сложной формы.

Методика вычислительного эксперимента. С помощью моделирования в системе компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) "ПолигонСофт" [9] проведено исследование связи расчетной пористости с критерием Ниямы в различных технологических процессах.

Механизмы образования усадочной пористости в отливках достаточно хорошо представлены в математических моделях современных программных пакетов. Многолетний опыт применения СКМ ЛП "ПолигонСофт" показал, что при соответствующей настройке модель образования пористости демонстрирует высокую степень адекватности экспериментальным данным [10, 11]. Это позволяет использовать расчетные значения пористости взамен экспериментальных данных, что существенно снижает трудоемкость определения критического значения критерия Ниямы.

Исследовали отливку простой формы в виде плиты размерами 480×140×25 мм. Отливка такой формы имеет следующие преимущества для данного исследования:

- 1) в отливке в процессе кристаллизации образуется один тепловой узел;
- 2) в середине плиты есть участок, на котором фронт роста кристаллов поступательно движется от стенок формы к центру отливки.

Эскиз и 3D-модель отливки показаны на рис. 1.

Расчеты проведены для отливок из сплавов 14X17H2Л и МЛ10 при заливке их в кокиль и форму из ХТС. Расчеты выполнены в программе СКМ ЛП "ПолигонСофт" в два этапа.

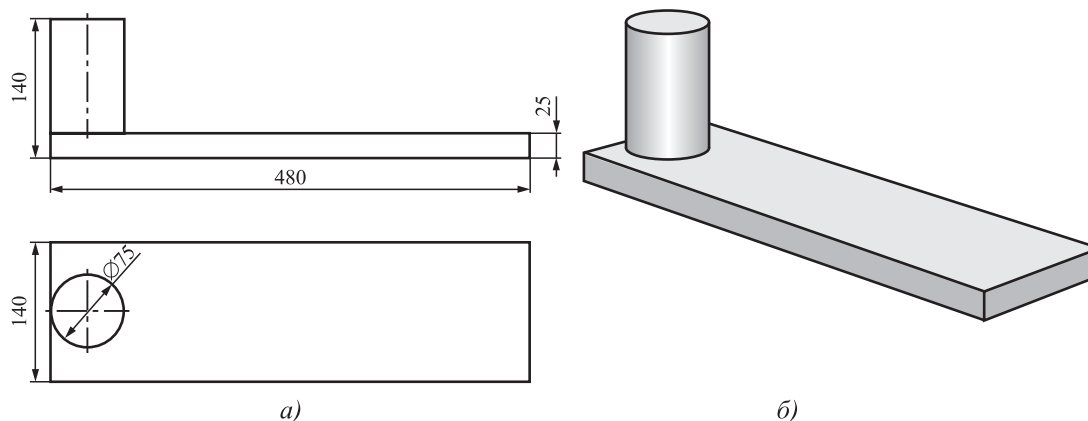


Рис. 1. Эскиз (а) и 3D-модель отливки (б)

На первом этапе проведено моделирование процесса кристаллизации металла для расчета распределения температуры в отливке с заданным временным шагом и получения распределения пористости в затвердевшей отливке.

На втором этапе с помощью модуля "Критерий-3D" СКМ ЛП "ПолигонСофт" выполнен расчет критерия Ниямы. Градиент температуры рассчитан на изотерме θ несколько выше температуры солидус:

$$\theta = T_S + 0,1(T_L - T_S),$$

где T_L, T_S — температуры ликвидус и солидус сплава соответственно.

Скорость охлаждения расплава вычислена как среднее значение за время кристаллизации расплава в двухфазной зоне:

$$\dot{T} = (T_L - T_S)/t_f.$$

Локальное время кристаллизации определено как разность времени достижения температуры ликвидус и солидус в данной точке отливки:

$$t_f = t_L - t_S.$$

Для уменьшения ошибки вычисления градиента температуры моделирование кристаллизации проведено с временным шагом 0,25 с на достаточно мелкой сетке с размером элемента ячейки 1 мм.

Приняты следующие единицы измерения: градиент температуры G — $K \cdot cm^{-1}$; скорость охлаждения \dot{T} — $K \cdot мин^{-1}$; критерий Ниямы Ny — $(K \cdot мин)^{1/2}/cm$.

Исходные условия для расчета температурных полей и химический состав сплавов 14X17H2Л и МЛ10 приведены в табл. 1—3.

1. Исходные температуры металла и формы

Сплав	Температура металла, °С	Материал формы	Температура формы, °С
14X17H2Л	1600	ХТС	20
МЛ10	720	Сталь	300

2. Химический состав стали 14X17H2Л, % мас.

С	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	Температура, °С	
						ликвидус	солидус
0,05...0,1	0,8...1,5	0,3...0,8	2,8...3,8	15...18	Основа	1490	1270

Исследование проведено на поперечном сечении примерно в середине плиты (рис. 2, см. обложку). Из полученного в результате расчета массива данных были отобраны значения в узлах расчетной сетки, находящихся максимально близко к горизонтальной линии симметрии X выбранного сечения.

Результаты исследования и их обсуждение.

В результате расчета кристаллизации в пакете СКМ ЛП "ПолигонСофт" были получены температурные поля для каждого момента времени, и на основании этих распределений рассчитаны распределения критерия Ниямы на изотерме θ .

На рис. 3 (см. обложку) показаны распределения объемной доли пористости и критерия Ниямы для сплава 14X17H2Л. На продольном сечении отливки показана только та пористость, которая может быть обнаружена при рентгенографическом исследовании отливки. Известно, что пористость ниже 0,1 % является естественной микропористостью любой отливки и поэтому не является дефектом. Как видно из рис. 3, пористость в пластине является типичной центральной пористостью, образующейся при затвердевании протяженных тонких стенок. Границы зоны пористости существенно зависят от технологии получения отливки. В плите, полученной в форме из ХТС, пористость сосредоточена вблизи оси плиты.

При заливке в кокиль пористость присутствует практически по всей пластине, за исключением узкой области на краях отливки. Важным параметром, влияющим на процесс образования пористости, является интенсивность теплоотвода от кристаллизующегося металла в форму [8]. Чем выше интенсивность охлаждения, тем большая объемная доля усадки локализуется в отливке в виде рассеянной пористости.

Снижение интенсивности охлаждения расплава благоприятно влияет на питание центральной части отливки. В то же время низкая интенсивность охлаждения приводит к уменьшению градиента температуры и, следовательно, к увеличению ширины двухфазной зоны, что затрудняет питание двухфазной зоны отливки.

3. Химический состав сплава МЛ10, % мас.

Zr	Zn	Nd	Mg	Температура, °С	
				ликвидус	солидус
0,4...1	0,1...0,7	2,2...2,8	Основа	659	609

На рис. 3, б представлено распределение значений критерия Ниямы для сплава 14Х17Н2Л. Полученные результаты подтверждают качественную взаимосвязь между критерием Ниямы и вероятностью образования пористости в отливке. В центральной части плиты значения критерия Ниямы существенно ниже, чем вблизи поверхности отливки, т.е. с уменьшением критерия Ниямы вероятность образования пористости увеличивается. Практический интерес представляет задача определения так называемого критического значения критерия Ниямы, ниже которого появление пористости наиболее вероятно.

На рис. 4 приведены зависимости, связывающие объемную долю пор, рассчитанную по модели пористости СКМ ЛП "ПолигонСофт",

с критерием Ниямы. Точки на рис. 4 являются значениями пористости в узлах расчетной сетки, расположенных вдоль центрального поперечного сечения отливки, которое показано на рис. 2. Стрелками указаны критические значения критерия Ниямы.

Полученные результаты позволяют определить критические значения критерия Ниямы для исследуемых сплавов (табл. 4).

Критические значения критерия Ниямы были использованы для определения местоположения зоны усадочных дефектов в отливках простой геометрической формы типа "плита" и в более сложной фасонной отливке с круговой симметрией "рабочее колесо".

На рис. 5 и 6 показаны границы зоны сосредоточения усадочной пористости, определенная

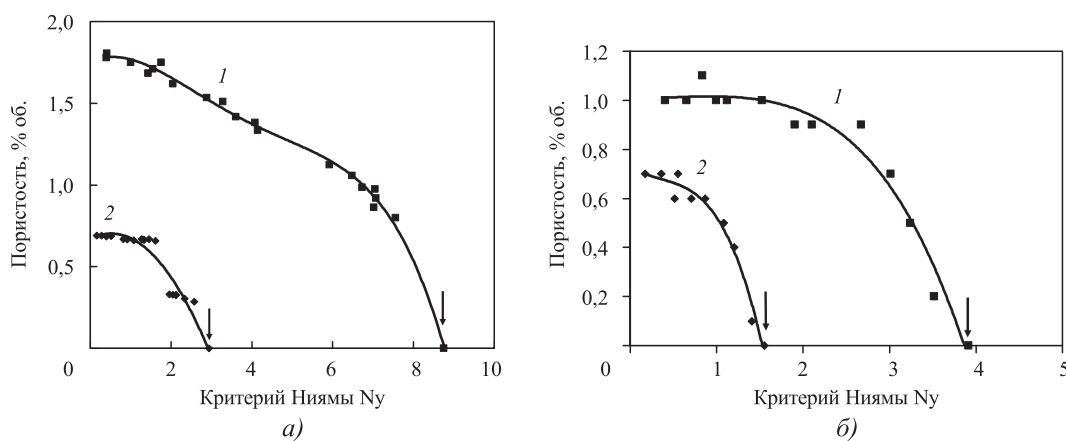


Рис. 4. Объемная доля пористости в зависимости от критерия Ниямы для отливки "плита" из сплавов 14Х17Н2Л (а) и МЛ10 (б) при литье в кокиль (1) и ХТС (2)

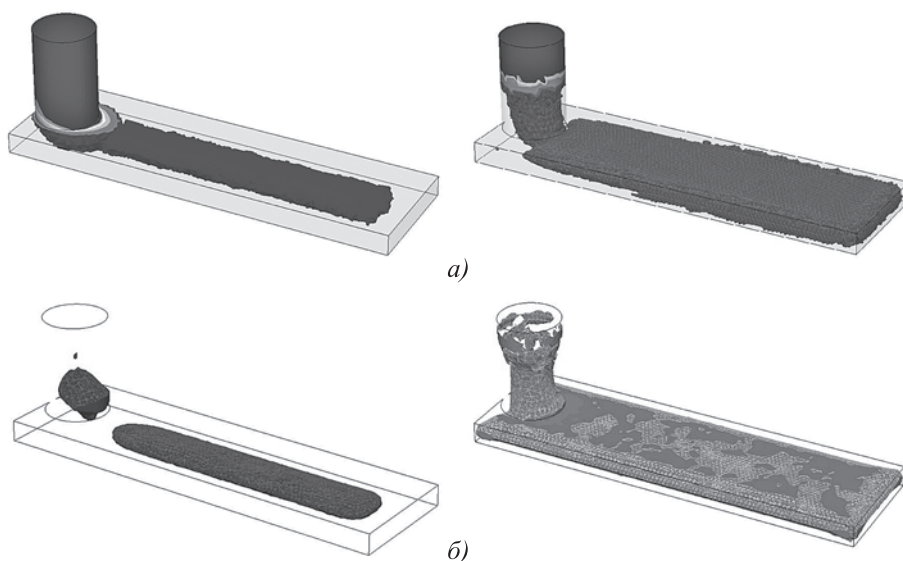


Рис. 5. Зона усадочной пористости в отливке "плита" из сплава 14Х17Н2Л: а — расчет пористости в СКМ ЛП "ПолигонСофт"; б — распределение критерия Ниямы (значения ниже критического). Слева — ХТС; справа — кокиль

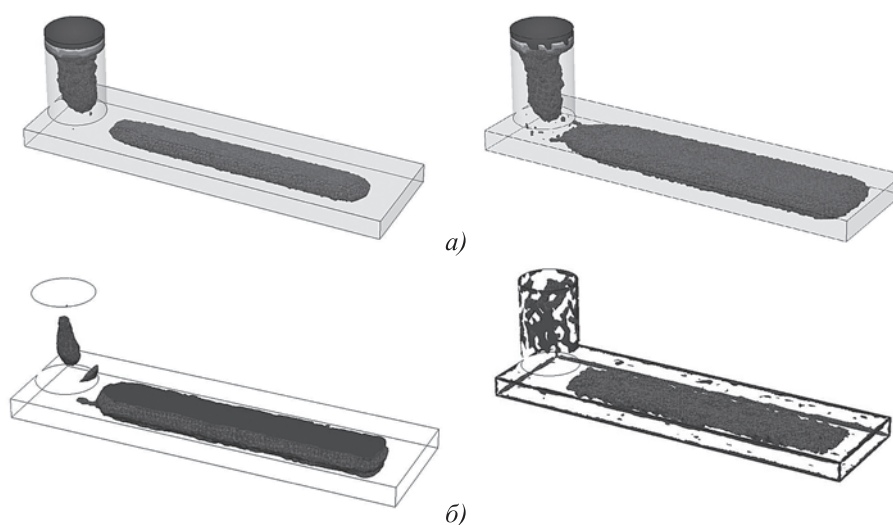


Рис. 6. Зона усадочной пористости в отливке "плита" из сплава МЛ10:
a — расчет пористости в СКМ ЛП "ПолигонСофт"; *б* — распределение критерия Ниямы (значения ниже критического). Слева — ХТС; справа — кокиль

4. Критические значения критерия Ниямы при литье в форму из ХТС и стальной кокиль

Сплав	Критические значения критерия $N_y, (K \cdot \text{мин})^{1/2}/\text{см}$	
	ХТС	Кокиль
14X17H2Л	2,9	8,9
МЛ10	1,5	3,9

двумя способами: прямым моделированием пористости и по распределению критерия Ниямы с учетом полученных критических значений.

Как видно из рис. 5 и 6, местоположение и форма зоны усадочных дефектов в отливке "плита", полученные прямым моделированием пористости в СКМ ЛП "ПолигонСофт" и определением зоны пористости по критерию Ниямы, удовлетворительно совпадают. Наиболее существенные отличия наблюдаются в углах плиты.

В работе [6] сделано предположение, что помимо градиента температуры и скорости охлаждения на пористость влияет кривизна изотермы, на которой определены эти величины.

В работе [8] установлено, что зависимости пористости от критерия Ниямы, полученные для двух серий узлов сетки, взятых вдоль вертикальной и горизонтальной осей отливки, не совпадают. Значения пористости вдоль горизонтальной оси X выше, чем на узлах, расположенных вдоль вертикальной оси Y (см. рис. 2). Это объясняется существенным влиянием

кривизны изотермы θ вблизи торцов отливки. Критические значения критерия Ниямы практически не зависят от выбора узлов сетки и, следовательно, от кривизны изотерм температурного поля. Это объясняет накопленный положительный опыт использования критерия Ниямы для прогнозирования усадочных дефектов.

Результаты прогнозирования границ зоны усадочных дефектов в сложной фасонной отливке "рабочее колесо" представлены на рис. 7 (см. обложку). Отливка имеет следующие размеры: диаметр 510 мм, высота 277 мм. Моделировался процесс кристаллизации данной отливки из сплавов 14X17H2Л и МЛ10 в форму из ХТС. Начальная температура металла сплава 14X17H2Л — 1650 °С, для МЛ10 — 750 °С.

На рис. 7 приведена пористость выше 0,1 % в отливке и границы сосредоточения усадочной пористости, определенные по критерию Ниямы.

Несмотря на влияние кривизны изотерм на точность прогнозирования зоны пористости с помощью критерия Ниямы, результаты для фасонной отливки с выраженной круговой симметрией вполне соответствуют картине, полученной прямым моделированием пористости, хорошее совпадение в местоположении и конфигурации зоны пористости в плоских элементах конструкции отливки. Образование зон пористости на кромках и во внутренних

углах (см. рис. 7, б, сплав МЛ10) свидетельствует о сильном влиянии кривизны температурного поля. Это влияние выше в случае сплава МЛ10, коэффициент теплопроводности которого в несколько раз выше, чем у стали 14Х17Н2Л.

Как известно, критерий Ниямы применим только для прогнозирования усадочной рас-сеянной пористости, образующейся в результате фильтрационного течения расплава в дендритном каркасе твердой фазы, т.е. в пределах двухфазной зоны отливки. Критерий Ниямы фактически прогнозирует падение давления в дендритном каркасе, являющееся причиной образования усадочных пор.

Формирование усадочной раковины в прибыли отливки происходит вследствие свободного течения жидкого металла вне двухфазной зоны отливки и, следовательно, не может быть связано с критерием Ниямы. Это объясняет полное несоответствие картины пористости в прибылях отливки на рис. 7, б с результатами прямого моделирования пористости (см. рис. 7, а). Для прогнозирования усадочной раковины критерий Ниямы не применим.

Заключение. Разработана методика определения критического значения критерия Ниямы на основе результатов компьютерного моделирования литейной технологии в СКМ ЛП "ПолигонСофт".

Получены зависимости пористости от критерия Ниямы в отливке "плита" для сплавов 14Х17Н2Л и МЛ10 при различных условиях охлаждения — в кокиле и ХТС.

Определены критические значения критерия Ниямы для сплавов 14Х17Н2Л и МЛ10, необходимые для прогнозирования зон пористости в отливках, опираясь только на температурные поля в отливке в процессе затвердевания.

Установлено, что критическое значение критерия Ниямы для любого сплава зависит от условий его охлаждения и поэтому его необходимо определять для каждого технологического процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Method** of Shrinkage Prediction and its Application to Steel Casting Practice / E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, S.A. Saito // AFS International Cast Metals Journal. 1982. Vol. 7, No. 3. P. 52—63.
2. **Relationship** Between Niyama Criterion and Radiographic Testing in Steel Casting / R.A. Hardin, S. Ou, K. Carlson, C. Beckermann // AFS Transactions. 2000. Vol. 108. P. 53—62.
3. **Carlson K.D., Ou S., Beckerman C.** Feeding of High-Nickel Alloy Castings // Metallurgical Transactions B. Dec. 2005. Vol. 36B. P. 843—856.
4. **Khaled I.** Prediction of shrinkage porosity in Ti—46Al—8Nb tilt-casting using the Niyama criterion function // International Journal of Metalcasting. 2013. Vol. 7, No. 4. P. 35—41.
5. **MagmaSoft.** URL: <http://www.magmaSoft.com> (дата обращения: 02.09.2021).
6. **Tavakoli R.** On the prediction of shrinkage defects by thermal criterion functions // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. 74. 569—579. DOI: 10.1007/s00170-014-5995-0.
7. **Голенок В.М., Иванина Е.С.** Прогнозирование объемной доли усадочной пористости с использованием критерия Ниямы // Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. "Студенческая весна: машиностроительные технологии". М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 8—12.
8. **Иванина Е.С., Монастырский В.П., Ершов М.Ю.** Количественная оценка образования усадочной пористости по критерию Ниямы // Материаловедение. 2021. № 5. С. 19—24.
9. **СКМ ЛП "ПолигонСофт".** URL: <http://www.polygonsoft.ru> (дата обращения: 15.09.2021).
10. **Монастырский В.П., Монастырский А.В., Левитан Е.М.** Разработка технологии литья крупногабаритных лопаток ГТД для энергетических установок с применением систем "Полигон" и ProCAST // Литейное производство. 2007. № 9. С. 29—34.
11. **Применение** CALS-технологий в литейном производстве ФГУП ММПП "Салют" / В.А. Поклад, О.Г. Оспенникова, С.В. Рудницкий, А.И. Алферов, В.И. Родионов, В.П. Монастырский // Литейное производство. 2007. № 8. 2007. С. 6—9.

Елена Святославна Иванина;
Валерий Петрович Монастырский, д-р техн. наук,
vpmonastyrskiy@gmail.com

П.А. Васильев, О.В. Христофоров, П.Г. Данилов, А.Г. Калинин,
В.Н. Осанов, И.П. Васильев, В.С. Григорьев
(Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)

Машина фрикционной сварки "Малахит"

Описана установка сварки трением с перемешиванием, предназначенная для проведения опытных работ по технологии сварки крупногабаритных конструкций. Приведены конструктивные схемы основных узлов установки. Технические характеристики установки позволяют получать опытные образцы сварного шва из алюминиевого сплава типа АМг5 толщиной до 20 мм, с длиной шва 2000 мм в продольном направлении и 1500 мм в поперечном. Максимальные поперечные размеры свариваемых конструкций 1500×800 мм. В качестве контрольных параметров процесса сварки в реальном режиме времени индицируются на пульте управления и записываются в архив значения вертикальной силы на инструменте, мощность, потребляемая электроприводом шпинделя, и горизонтальная сила на сварочном столе в направлении сварки.

Ключевые слова: станкостроение; сварка трением с перемешиванием; алюминиевые сплавы; сварные узлы из алюминиевых сплавов.

Friction stir welding unit is described, designed for experimental works on the welding technology of large-sized items. Structural diagrams of the main units of the installation are presented. Technical characteristics of unit make it possible to obtain prototypes of weld made of aluminum AMg5 type alloy with thickness of up to 20 mm, with weld length of 2000 mm in the longitudinal direction and 1500 mm in the transverse direction. The maximum transverse dimensions of the welded structures is 1500 ×800 mm. The parameters of the welding process in real time are displayed on the control panel and recorded in the report: the values of the vertical force on the tool, the power consumed by the electric drive of the spindle and the horizontal force on the welding table in the direction of welding.

Keywords: machine-tool industry; friction stir welding; aluminum alloys; aluminum weldments.

Известно, что широкое применение алюминиевых сплавов в материальном производстве обусловлено тремя факторами: стойкость к коррозии, малая удельная масса, возможность рециклинга по истечении срока службы изделий. Перечень областей применения практически не ограничен, проработаны конструктивные решения и соответствующие технологии [1].

Востребованный технологический процесс сварки трением с перемешиванием имеет существенные преимущества: сварка за один проход заготовок из алюминиевых сплавов толщиной 20 мм и более, а также возможность изготовления сборочных узлов, содержащих заготовки из алюминиевых сплавов различных марок, в том числе трудно свариваемых способом плавления.

В настоящее время в России имеется ряд установок для сварки трением с перемешиванием, предназначенных для проведения опытных работ и для серийного производства изделий из алюминиевых сплавов: установка серии LEGIO производства компании ESAB (Швеция) в РКЗ ГК НПЦ им. М.В. Хруничева [2], установка PowerStir 345C производства Великобритании в РКК "ЭНЕРГИЯ" [3], установка I-STIR PDS-5 производства компании MTS (США) в Перм-

ском национальном исследовательском политехническом университете [4], установка FSW SuperStir Plant производства компании ESAB (Швеция) в ЗАО "Чебоксарское предприятие "Сеспель" [5], установка сварки цилиндрических обечаек в АО "Рузхиммаш".

Также проводятся исследовательские работы на отечественных установках "Странник" в Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (г. Томск) [6] и ERNEST в Чувашском государственном университете [7]. В серийном производстве эксплуатируются установки "Габарит А" в ЦНИИ КМ "Прометей" (г. Санкт-Петербург) [8] и установка сварки алюминиевых карт в ЗАО "Чебоксарское предприятие "Сеспель" [9]. По прошествии многих лет способ сварки металлов трением, изобретенный Ю.В. Клименко (а.с. 195846 СССР), нашел свое широкое применение.

Разработана и изготовлена установка сварки трением с перемешиванием "Малахит", предназначенная для выполнения опытных работ по сварке крупногабаритных конструкций для отработки технологических режимов сварки и приобретения навыков проектирования соответствующей оснастки.

Технические характеристики установки "Малахит"

Диапазон толщин свариваемых встык плоских образцов из алюминиевого сплава типа АМг5, мм 1,5...20
 Максимальная длина сварного шва, мм:
 по оси X 2000
 по оси Y 1500
 Рабочий ход инструмента по оси Z, мм. 800
 Максимальные размеры рабочего пространства стола, мм. 3000×2000
 Скорость сварки, мм/мин. 10...500
 Максимальная частота вращения инструмента, мин⁻¹ 2500

Сила на инструменте, кН 1...3,5
 Угол наклона инструмента, ° 0...3
 Мощность электродвигателя шпинделя, кВт 18,5
 Максимальная потребляемая мощность, кВт 25

Общий вид и фотография машины фрикционной сварки показаны на рис. 1. Оборудование состоит из двух основных законченных конструктивных частей: сварочного центра и силового шкафа электрооборудования, соединенных между собой электрическими кабелями.

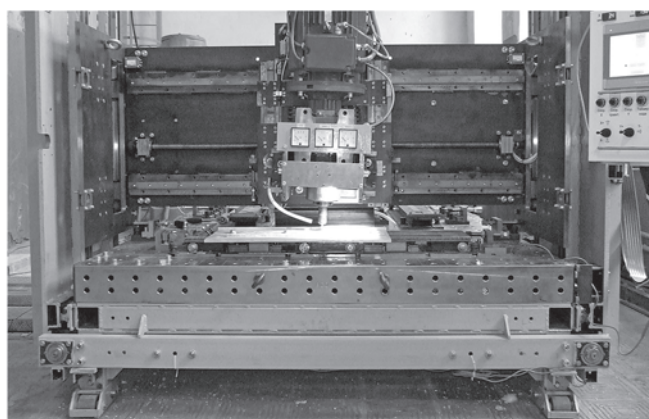
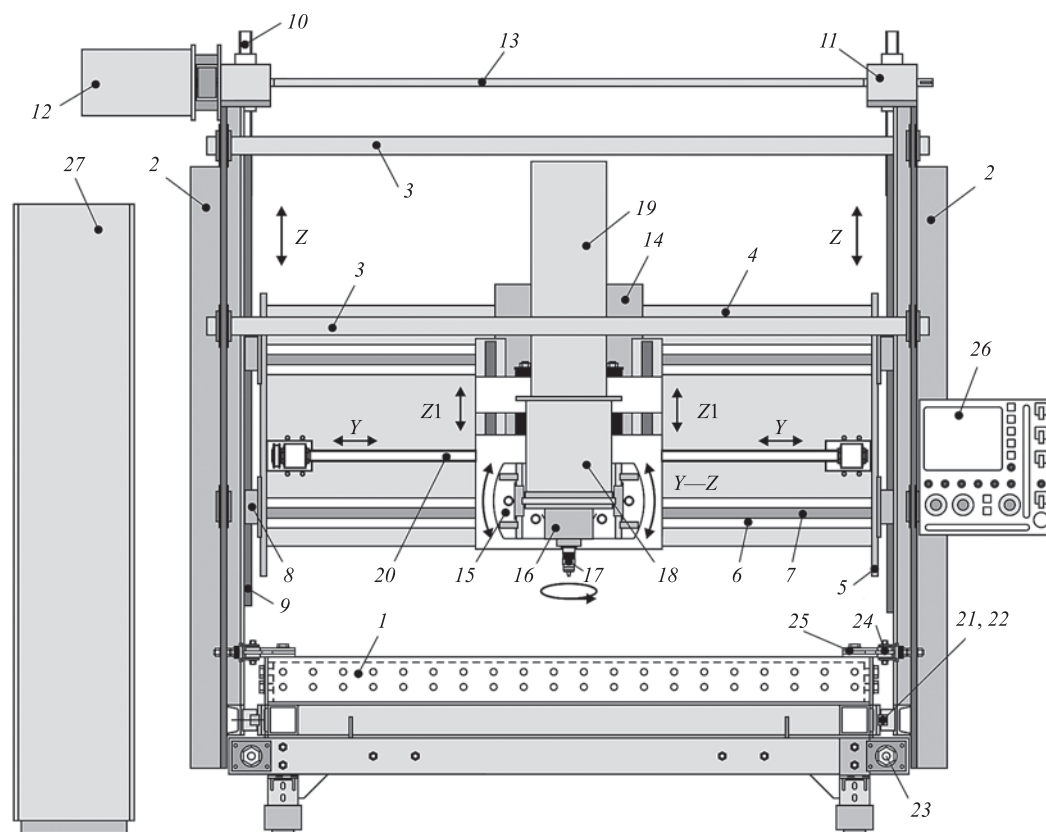


Рис. 1. Машина фрикционной сварки "Малахит"

Основой сварочного центра является сварочный стол 1 (см. рис. 1), на котором установлены стенки несущие боковые 2, перемещающиеся в продольном направлении по оси X . В верхней части стенки связаны перемычкой 3 для обеспечения жесткости конструкции. На боковых стенках смонтирован портал установки, состоящий из стенки несущей 4 и боковых стенок 5. На лицевой стороне несущей стенки установлены посредством направляющих пластин брейсы 7 HR-35-N с каретками HRC-35-MN. На боковых стенках 2 также установлены каретки 8 HRC-35-MN и рельсы 9 HR-35-N, обеспечивающие перемещение портала в вертикальном направлении по оси Z силовыми винтами 10 Tг-40×7.

Домкраты 11 CHS-4-TS-C1200-R30-TP-DE (см. рис. 1), представляющие собой червячные редукторы с коэффициентом передачи $I = 30$ с упорными подшипниками, рассчитанными на нагрузку до 50 кН, вращают силовые винты, обеспечивая движение портала в вертикальном направлении по оси Z . В качестве привода домкратов применен электродвигатель 12 АДЧР90L4-2,2 кВт, синхронизация вращения обеспечивается перемычкой 13. На несущей стенке портала установлен суппорт 14. В состав суппорта входят платформа шпинделя 15, шпиндель 16 со сварочным инструментом 17, редуктор 18 FRD-52/V3-V4 и электродвигатель 19 АДЧР160M4-18,5 кВт. Перемещается суппорт в поперечном направлении по оси Y силовым винтом 20.

На боковых поверхностях несущей рамы сварочного стола смонтированы рельсы 21 HR-35-N (см. рис. 1) с установленными на них каретками 22 HRC-35-MN по три каретки на каждом рельсе, воспринимающими на

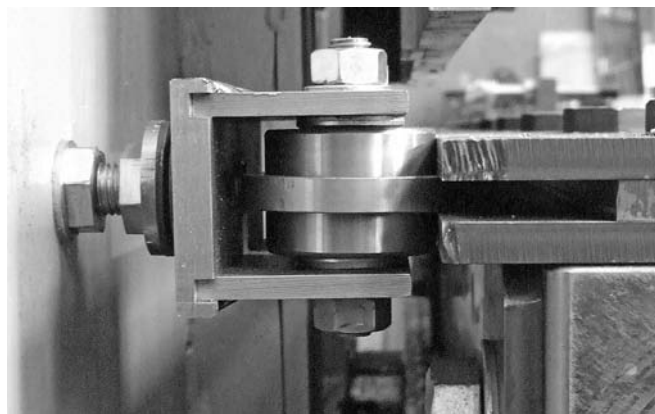


Рис. 2. Подшипниковый упор сварочного центра

себя силу F_z при сварке. Перемещение портала в продольном направлении по оси X осуществляется силовыми винтами 23 Tг-36×6. Для обеспечения поперечной жесткости конструкции стол 1 — боковые стенки портала 2 — перемычка 3 (см. рис. 1) на боковых стенках установлены подшипниковые упоры 24, опорой для которых служат комплекты пластин 25, смонтированные на рабочей поверхности стола. Подшипниковый упор показан на рис. 2. Управление работой установки осуществляется с пульта 26. Силовая часть коммутационного электрооборудования смонтирована в шкафу 27.

Конструкция сварочного стола и схема подачи портала по оси X приведены на рис. 3. Несущая часть стола изготовлена сваркой продольных 1 и поперечных 2 балок из квадратных труб 100×100 мм. Для усиления жесткости поперечных балок на их верхнюю и нижнюю стороны наварены пластины 3 толщиной 10 мм. Вертикальные опоры 4 также выполнены из квадратных труб.

На полученную несущую раму смонтированы сварочные столы 5 (см. рис. 3) производства фирмы Bernd Siegmund (Германия) коробчатого типа с установленными внутри дополнительными ребрами жесткости. Габаритные размеры столов 2000×1000×150 мм. Толщина стенок 18 мм. На лицевой и боковых поверхностях столов сделаны отверстия диаметром 22 мм в виде квадратной

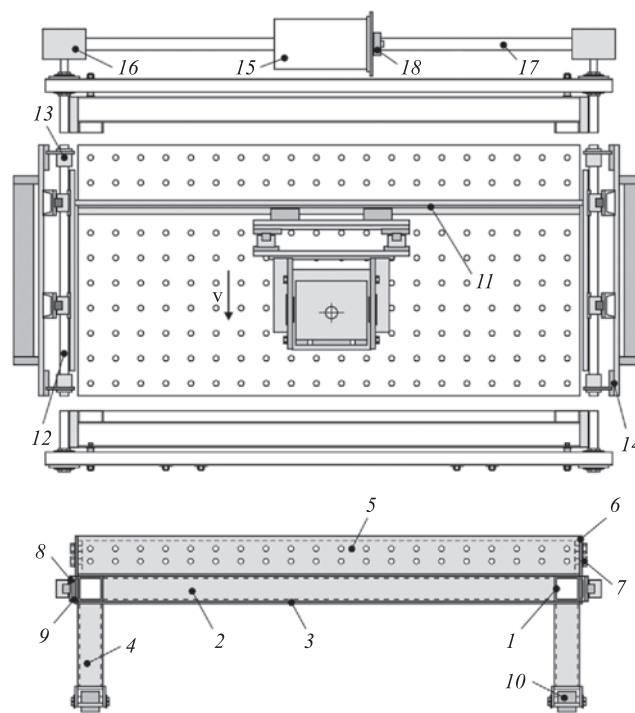


Рис. 3. Сварочный стол и схема подачи портала по оси X

сетки с шагом 100 мм. Связка столов с несущей рамой обеспечивается фиксирующими пластинами 6 и крепежными болтами 7. На боковую сторону продольных балок приварены швеллер 8 с направляющей пластиной 9. Во фрезерованный паз пластины устанавливается рельс HR-35-N с каретками HRC-35-MN. Для обеспечения подвижности установки при ее монтаже сварочный стол устанавливается на роликовые опоры 10.

Движение портала 11 (см. рис. 3) по оси X установки происходит при вращении силовых винтов 12 с трапецеидальной резьбой Тг 36×6, сила с которых передается через гайки 13 на несущие боковые стенки 14. Привод вращения винтов состоит из электродвигателя 15 АДЧР90L4-2,2 кВт и двух червячных редукторов 16 SRT-70-15-AC-28 с коэффициентом передачи $I = 15$. Синхронизация вращения редукторов осуществляется валом 17, связанным с электродвигателем зубчатым ремнем 8.

Конструкция суппорта установки схематически приведена на рис. 4. Основой конструкции является платформа 1 с установленными на ней направляющими пластинами 2 и рельсами 3 HR-35-N с каретками 4 HRC-35-MN. На каретки через промежуточные пластины 5 устанавливается опорная плита 6 с поворотной платформой шпинделя 7. На платформе смонтирован

основной рабочий узел установки, состоящий из шпинделя 8 со сварочным инструментом 9, понижающего редуктора 10 типа FRD 52/B3 и электродвигателя 11 АДЧР160M4-18,5 кВт. В комплект установки входят три редуктора FRD 52/B3 с числами передачи $I = 2,5; 4$ и 10 , что необходимо для возможности работы установки в широком диапазоне частот вращения шпинделя при сохранении мощности на его выходном валу.

Плита поворотная 12 (см. рис. 4), на которой монтируются шпиндель и редуктор с роликами 13, вращается в плоскости XZ для установки необходимого наклона сварочного инструмента при проведении сварки по оси X . Механизм вращения шпинделя в плоскости ZX показан на рис. 5. Фиксация плиты осуществляется болтами 14 (см. рис. 4). Изменение наклона инструмента в плоскости YZ при сварке по оси Y достигается вращением платформы шпинделя, фиксируемой болтами 15. Перемещение шпинделя по оси Z до соприкосновения с поверхностью свариваемых заготовок и генерации необходимой силы F_z осуществляется силовым винтом 16 Тг-40×7, установленным в упорном подшипнике 17. Силовой винт передает силу через промежуточную плиту-проводник 18 блоку силовых пружин 19. Привод

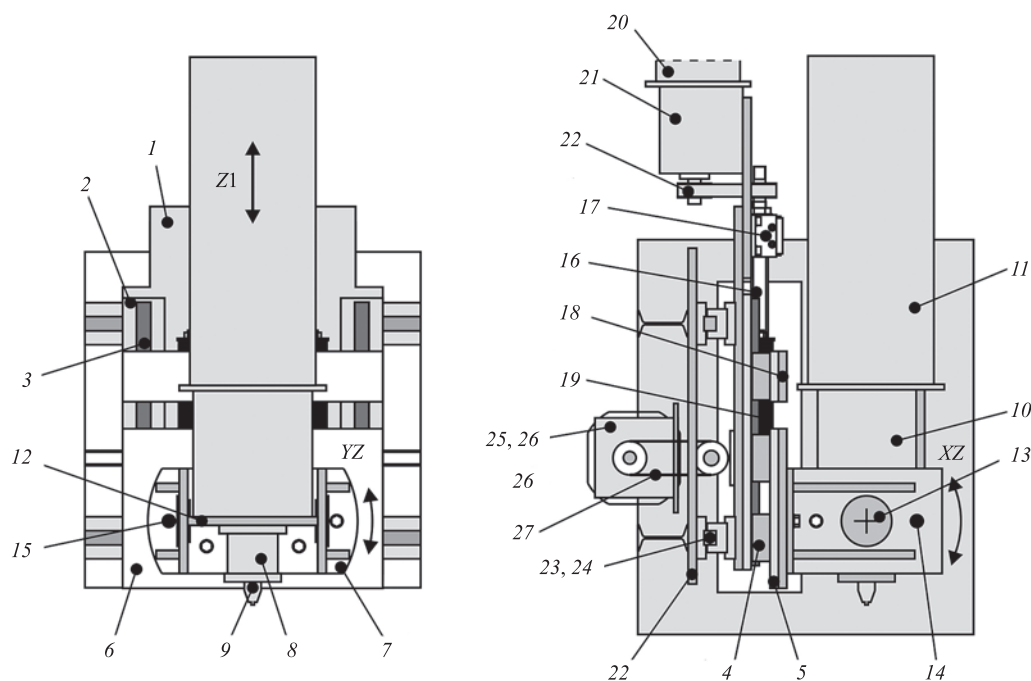


Рис. 4. Конструкция суппорта

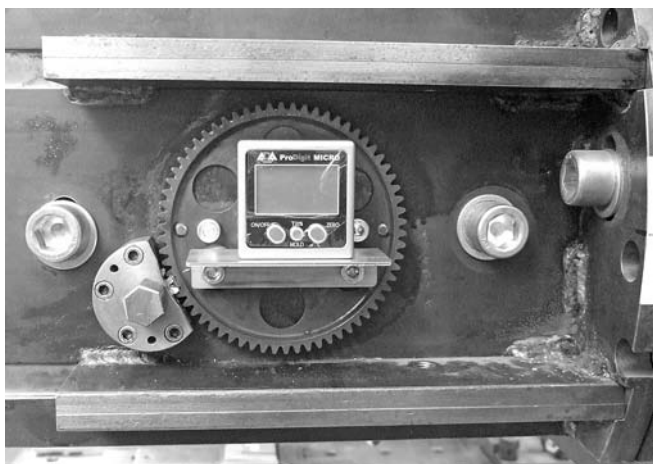


Рис. 5. Механизм вращения шпинделя в плоскости XZ

вращения винта состоит из электродвигателя 20 АДЧР90Л4-2,2 кВт, редуктора 21 FRD 32/В3-V25 и зубчатого ремня 22.

Суппорт установлен на каретках 23 HRC-35-MN (см. рис. 4) и перемещается по рельсам 24 HR-35-N по оси Y под воздействием силового винта 25 Tr-36×6. Привод вращения винта состоит из электродвигателя 26 АДЧР90Л4-2,2 кВт, редуктора 27 FRD-32/В3-N25 и зубчатого ремня 28.

Схема генерации вертикальной силы на сварочном инструменте условно показана на рис. 6. Платформа шпинделя 1, установленная на каретке 2 HRC-35-MN, перемещается в вертикальном направлении по оси $Z1$ по рельсо-

вым направляющим 3 HR-35-N. При вращении силового винта 4 Tr-40×7 гайка 5 с пластиной проводника 6 сжимают пружины 7 CF63×203, что приводит к возникновению силы F_z , пропорциональной величине сжатия пружин. Пружины 8 CL63×76 предназначены для компенсации веса платформы шпинделя с установленными на ней элементами конструкции для обеспечения линейности характеристики сила F_z — координата $Z1$.

Данный прием генерации силы позволяет избежать использования гидравлической системы, традиционно применяемой для подобных целей, что значительно упрощает конструкцию установки и расходы на эксплуатацию. Недостатком является невозможность мгновенного снятия силы по окончании сварочного процесса. Частично данная проблема решается заданием максимальной частоты вращения привода подачи силового винта при подъеме шпинделя. В сборке блок пружин описывается коэффициентом жесткости 808 Н/мм.

Соосное расположение электродвигателя, редуктора и шпинделя не позволяет реализовать процесс охлаждения инструмента вследствие подачи охлаждающей жидкости во внутреннюю полость инструмента. Опыт эксплуатации установки фрикционной сварки ERNEST показал, что обдувом воздухом инструмента снаружи можно обеспечить необходимый температурный режим. Для этого в комплект описываемого сварочного оборудования входит вихревая воздуходувка

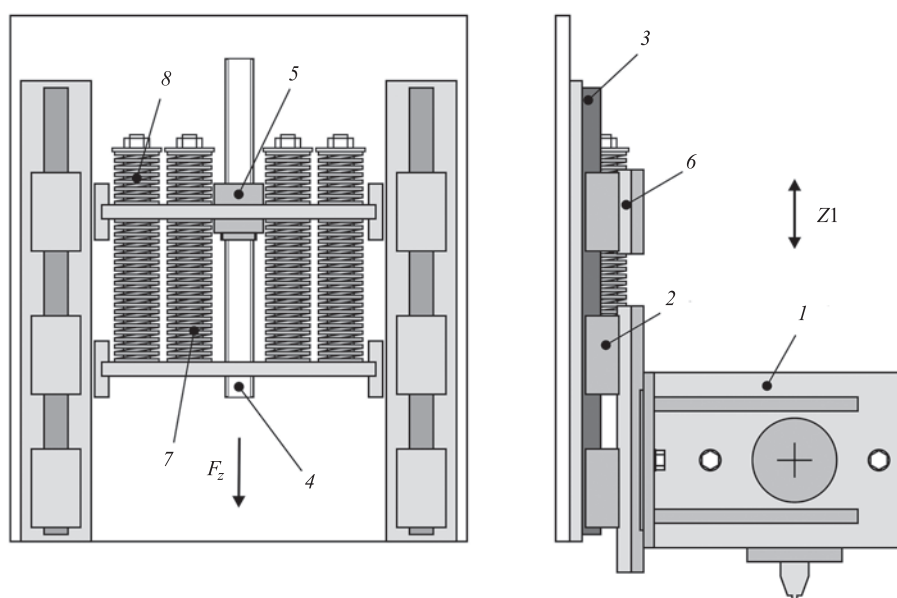


Рис. 6. Схема генерации вертикальной силы на сварочном инструменте

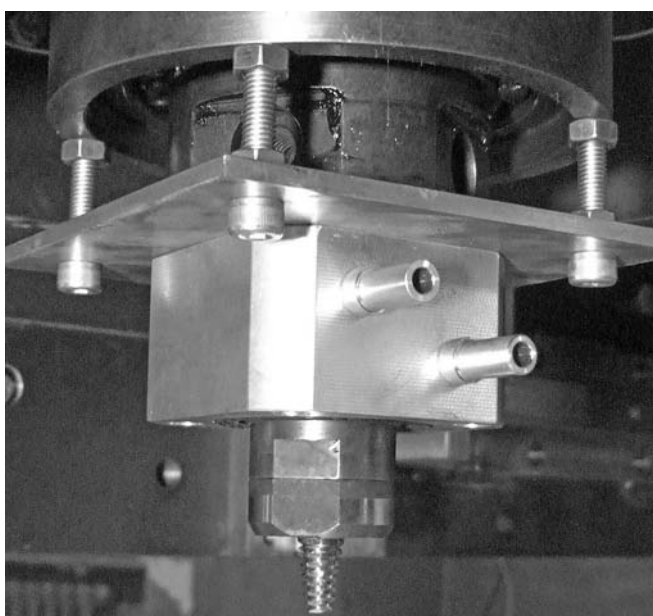


Рис. 7. Рубашка охлаждения инструмента

Green Tech 2RB 410-M103. Поступающего потока воздуха достаточно для охлаждения инструмента и места сварки. Интенсивное охлаждение воздухом места сварки минимизирует остаточную деформацию при дальнейшем охлаждении сварочного шва. Также конструкция инструмента позволяет реализовать жидкостное охлаждение при установке на инструмент рубашки охлаждения, как показано на рис. 7.

Процесс сварки заключается в установке соединяемых элементов на рабочем столе, их закреплении и выполнении операции сварки согласно рис. 8. Основными элементами конструкции стола являются основание 1 и подвижная платформа 2, установленная на каретках 3,

перемещающихся на рельсовых направляющих 4. В левой части стола находится тензодатчик 5, позволяющий контролировать силу F_y в процессе сварки, в правой — упор 6. В начале проведения сварочных работ вращением силового винта упора задается первоначальная сила в направлении сварки, значение которой индицируется на пульте управления. Эта процедура позволяет задать нулевую точку и проводить сварку в любом из двух возможных направлений.

Установка заготовок перед сваркой возможна по двум вариантам. В первом случае заготовки 7 стандартного поперечного размера фиксируются пластинами 8 и прижимаются сухарями 9, как показано в левой части рис. 8. Для сварки заготовок произвольного поперечного размера используется устройство фиксации 11, как показано в правой части рис. 8. Стол крепится на сварочном столе установки посредством зажимных устройств 12.

На рис. 9 приведена фотография процесса сварки внахлест двух пластин из сплава АД31 толщиной 12 мм, высота сварочного инструмента 20 мм. Поперечное сечение сварного шва приведено на рис. 10.

Все электроприводы станка сделаны на основе асинхронных частотно-регулируемых приводов с векторным бездатчиковым управлением Omron серии Q2V (Япония) на двигателях с принудительной вентиляцией серии АДЧР. Контроллер станка и пультовой комплекс выполнены на основе свободно программируемых приборов ОВЕН ПЛК160 и сенсорной панели оператора Weintek (Тайвань). Измерительная система по осям X и Y подстроена на относи-

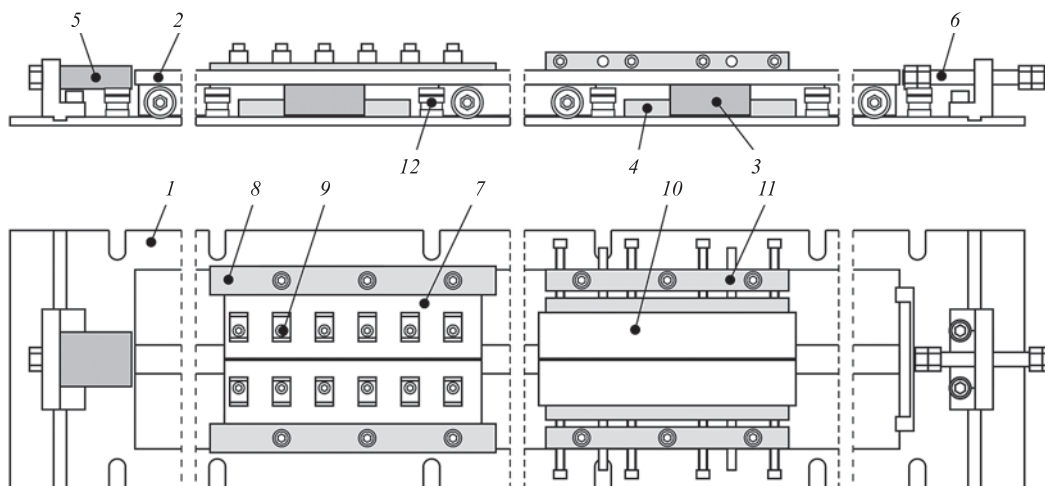


Рис. 8. Установка заготовок на рабочем столе

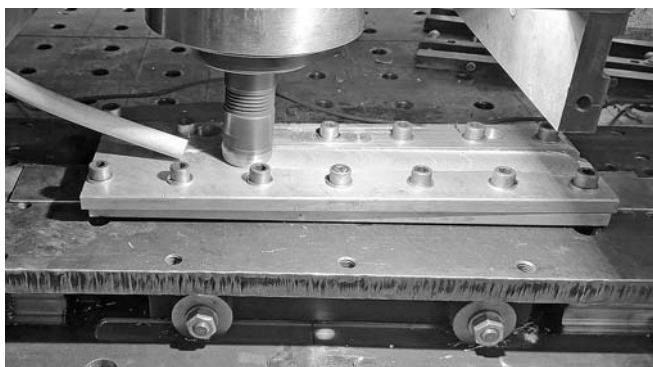


Рис. 9. Сварка внахлест пластин из сплава АД31

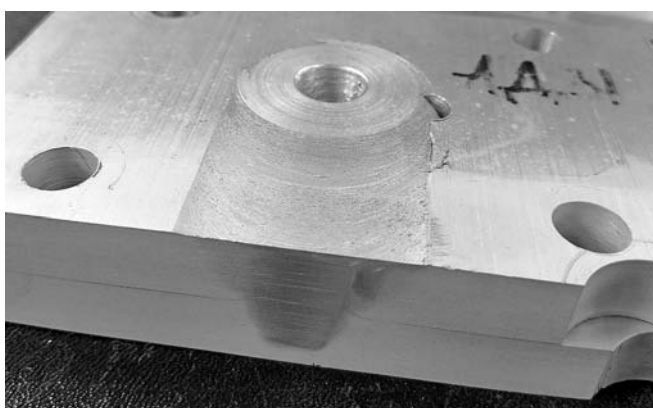


Рис. 10. Поперечное сечение сварного шва

тельных энкодерах Delta (Тайвань) в винтовых передачах, по осям Z и $Z1$ — на абсолютных энкодерах тросового типа SICK (Германия). Электрооборудование и кабеленесущие системы сгруппированы по уровням рабочих напряжений с разделением сторон силовой и слаботочной части относительно станка и в шкафу приводов относительно преобразователей частоты и вводного распределительного устройства.

Система управления движением спроектирована в виде трех шкафов: шкаф приводов, подвижный шкаф контроллера и подвижный шкаф пульта на портале. Рабочее напряжение слаботочных сетей 24 В. Стабильный интерфейс связи между приборами шкафа контроллера и преобразователями частоты выполнен на основе приборов MOXA TCF-142-M через гибкое оптоволокно.

Станок спроектирован всесторонне управляемым и конфигурируемым с точки зрения управления движением и дальнейшего развития под новые технологические процессы. Задание частот вращения приводов преимущественно аналоговое через потенциометр в клеммы пре-

образователей, задание направления движения аналоговое через клеммы дискретных входов преобразователей. Работа конечных выключателей всех координат сделана на разрыв аналогового задания направления. Индикация задания скоростей по приводам производится на панели оператора интерфейсным опросом преобразователей с последующим приведением в единицы измерения скорости перемещения. Радиусы приведения введены в контроллер станка на основе заложенных коэффициентов передач механических узлов. Используемые средства промышленной автоматики дополняют функционал станка функцией записи протоколов шва в формате CSV-таблиц, совместимых с Excel.

Аварийная сигнализация спроектирована на основе встроенного реле преобразователей частоты. Кнопка аварийного останова вводит в дискретные входы всех преобразователей логический сигнал "Авария". Сброс аварии — отдельная кнопка на шкафу приводов с командой в клеммы всех преобразователей частоты. В параметрах приводов аварийный останов запрограммирован экстренной остановкой, сброс аварии возможен только при снятии управления с приводов на пульте для исключения послеаварийного движения. Для любой последовательности аварийных ситуаций заложена светозвуковая сигнализация до снятия управления с них и нажатия кнопки сброса аварии.

Режим полуавтоматического хода сварки с повторяемостью швов реализован функционалом установленных контроллеров на открытых языках МЭК61131-3 с заменой участия человека в стадиях: внедрение в материал, регулятор силы, фиксация порога мощности на шпинделе, ход в направлении шва, выход из материала, возврат на исходную позицию.

Заключение. Описанная установка фрикционной сварки «Малахит» позволяет решать следующие задачи:

- разработка и испытание технологической оснастки для сварки крупногабаритных изделий в условиях значительных механических напряжений;
- отработка режимов сварки крупногабаритных изделий с минимальными остаточными деформациями;
- отработка принципиально новых конструктивных решений изделий из алюминиевых, в том числе разнородных сплавов;

- оптимизация алгоритмов автоматического управления сварочным процессом;
- ускорение внедрения в массовое серийное производство технологии сварки трением с перемешиванием как технологии с минимальным загрязнением окружающей среды за счет исключения выброса в атмосферу оксида алюминия, что происходит при дуговой сварке.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность сотрудникам машиностроительного факультета и служб Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова за оказанную помощь при проведении работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Остерман Ф.** Технология применения алюминия / пер. с нем. под рук. и общ. ред. д.т.н. В.Г. Борисова, к.т.н. М.З. Локшина. М.: АПРАЛ, 2019. 872 с.
2. **Фрикционная** сварка алюминиевых лейнеров металлокомпозитных баллонов высокого давления / В.А. Половцев, Н.В. Макаров, Г.В. Шилло, А.В. Сабанцев, Т.Н. Смирнова, М.М. Штрикман // Сварочное производство. 2007. № 12. С. 24–27.
3. **Отработка** технологии сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов 1570С, АМГ6 большой толщины для использования в перспективных разработках РКК "ЭНЕРГИЯ" / С.Ю. Шачнев, В.А. Пашенко, И.Д. Махин, А.В. Базескин, А.Д. Дубовицкий // Космическая техника и технологии. 2016. № 4. С. 24–30.
4. **Карманов В.В., Каменева А.Л., Карманов В.В.** Эволюция микроструктуры, состава и твердости пластин из алюминиевого сплава АА2024 в процессе

сварки трением с перемешиванием под влиянием удельного давления на инструмент // Сварка и диагностика. 2015. № 5. С. 31–35.

5. **Технология** сварки трением с перемешиванием в производстве алюминиевых полуприцепов / В.А. Бакшаев, П.А. Васильев, Л.К. Гордон, Ю.А. Тодин, С.В. Васильев // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 12. С. 13–17.

6. **Станок** для сварки трением с перемешиванием "Странник" / П.А. Васильев, А.В. Евграфов, В.Н. Осанов, А.Н. Иванов, В.А. Белобородов // Сварщик в России. 2017. № 2. С. 6–10.

7. **Установка** фрикционной сварки ERNEST / П.А. Васильев, В.Н. Осанов, А.В. Евграфов, А.Г. Калинин, М.А. Шведов, О.В. Христофоров, В.С. Григорьев // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15, № 9. С. 392–398.

8. **Пат. 156976 РФ.** Установка сварки трением с перемешиванием крупногабаритных конструкций / Алифиренко Е.А., Бакшаев В.А., Васильев П.А., Додон Р.В., Орыщенко А.С., Осокин Е.П., Пименов А.В. Приоритет от 25.03.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.

9. **Сварка** трением с перемешиванием. Контроль параметров и управление процессом / В.А. Бакшаев, П.А. Васильев, С.В. Васильев, Р.Р. Гайнуллин, С.Н. Чумаров, А.Х. Рахимов // Сварщик в России. 2014. № 1. С. 24–27.

Пётр Анатольевич Васильев,
svarkacheb@yandex.ru;

Олег Владимирович Христофоров;

Павел Геннадьевич Данилов;

Алексей Германович Калинин, канд. техн. наук;

Владимир Николаевич Осанов;

Иван Петрович Васильев;

Владимир Станиславович Григорьев



Экспериментальное исследование силовых режимов совмещенного процесса обжима с утонением*

Рассмотрена операция холодного обжима и одновременного утонения стенки в заготовке. Исследованы силовые параметры данной операции. Исследования выполнены экспериментально. По результатам эксперимента получены вторичные математические модели.

Ключевые слова: обжим; экспериментальные исследования; сила; моделирование.

The operation of cold reduction and simultaneous thinning of the wall in the workpiece is considered. The power parameters of this operation are studied. The researches is carried out experimentally. Secondary mathematical models are obtained from the results of the experiment.

Keywords: reduction; experimental researches; force; modelling.

В современных реалиях промышленного производства критически важным является обеспечение максимальной производительности при минимальных трудозатратах [1, 2]. В области обработки давлением данного эффекта можно добиться путем совмещения нескольких операций за один переход. При совмещении некоторых процессов возрастают силы деформирования, возможен также рост вероятности потери устойчивости заготовки [3, 4]. Поэтому возникает необходимость обоснования данных операций. Однако не все методы анализа позволяют обосновать совмещенные процессы обработки давлением.

Поэтому в статье приведены результаты экспериментальных исследований операции холодного обжима с одновременным утонением стенки в деформируемой заготовке (рис. 1). Наружный диаметр трубной заготовки принят равным $D_0 = 80$ мм. Толщина стенки заготовки 6 мм, высота заготовки 120 мм.

Коэффициент утонения при калибровке стенки

$$k_{\text{ут}} = (D_0 - D_1) / (D_M - D_{\text{п}}) = 0,8 \dots 1,$$

где D_M , $D_{\text{п}}$ — диаметр матрицы и пуансона.

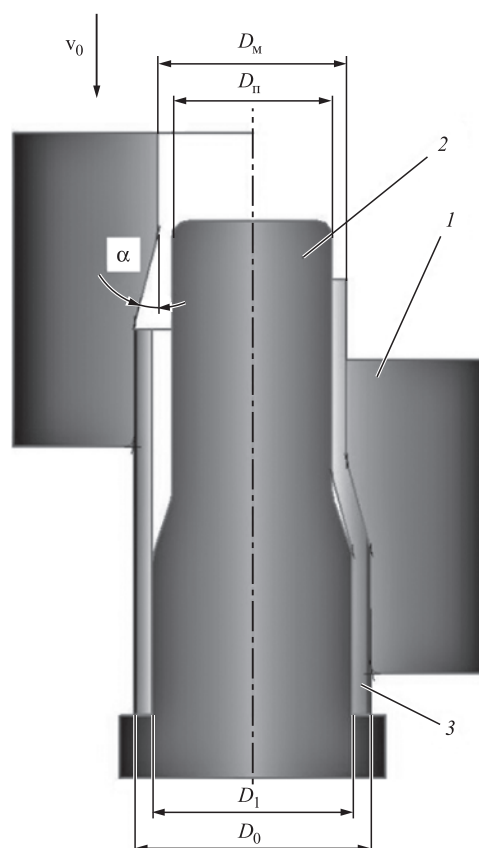


Рис. 1. Схема обжима с калибровкой:

1 — матрица; 2 — оправка; 3 — заготовка

* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00401.

Коэффициент обжима принят равным $k_{обж} = D_0/D_M = 0,65...0,85$.

Для рассмотренных значений коэффициента обжима и коэффициента утонения рассмотрены углы конусности $\alpha = 12...32^\circ$. Материал заготовки — сталь 10.

Для выполнения экспериментальных исследований толстостенных труб применяли опытную оснастку, представляющую собой совокупность верхних 1 и нижних 2 плит (рис. 2), пуансона 3, оправки 4, матрицы 5, системы извлечения 6—8. Данную оснастку устанавливали на гидравлическом пресс ДБ 2432.

На рис. 3 приведена фотография детали, полученной в ходе опытов.

Проведены опыты по оценке силы совмещенного процесса. Для обобщения данных по экс-



Рис. 3. Полученная деталь

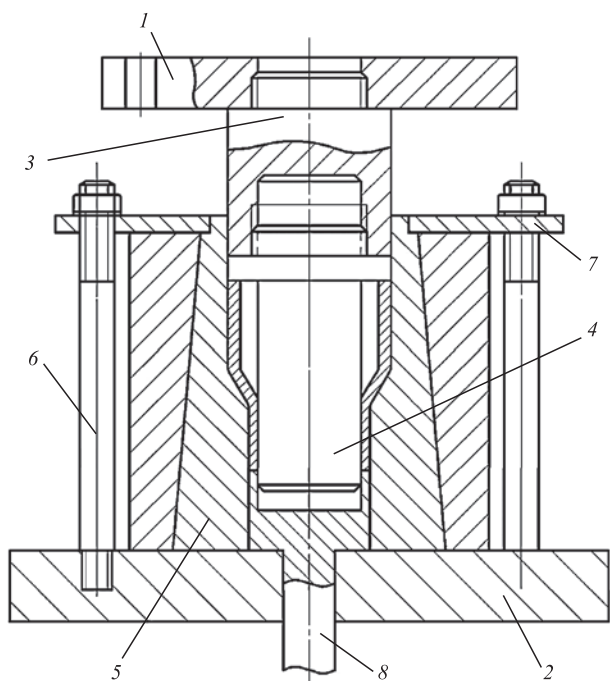


Рис. 2. Штамповая оснастка для обжима с утонением

перименту сформирована таблица факторного пространства для оценки сил (табл. 1) [6, 7].

Матрица планирования при оценке силы представлена в табл. 2 [6, 7].

Значения сил при обратном выдавливании исследуемых сплавов по представленной в табл. 2 матрице планирования в трех параллельных опытах показаны в табл. 3 [6, 7].

По результатам статистических исследований получены выражения для оценки силы совмещенного процесса в кодированных величинах:

$$Y = 713,5 - 121,75X_1 - 145,5X_2 + 30,25X_1X_2,$$

и натуральных величинах

$$P = 4978 - 3940k_{обж} - 3723k_{ут} + 3025k_{обж}k_{ут}.$$

1. Факторное пространство оценки силы

Факторы			Уровни варьирования факторов		
Наименование	Натуральное значение	Кодированное обозначение	$X_{i\min} (X_i = -1)$	$X_{i0} (X_i = 0)$	$X_{i\max} (X_i = +1)$
Коэффициент обжима	$k_{обж}$	X_1	0,65	0,75	0,85
Коэффициент утонения	$k_{ут}$	X_2	0,8	0,9	1,0
Угол конусности	α	X_3	12	22	32

2. Матрица планирования при оценке силы

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_2	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	
1	+	-	-	-	+	+	+	-	
2		+	-		-	-		-	-
3		-	+			-	+	+	
4		+	-		+		-	-	+
5		-	+	-		+	+	-	
6		+	-			-	-		-
7		-	+	-			+	+	-
8		+	-		-	-	-	+	

3. Значения силы, кН, в трех параллельных опытах

Номер опыта	y_1	y_2	y_3	\bar{Y}
1	945	1115	888	983
2	661	779	621	687
3	614	724	577	638
4	442	521	415	459
5	999	1178	939	1039
6	699	824	657	727
7	655	772	615	681
8	475	560	446	494

Полученное по результатам эксперимента выражение может быть полезно при назначении технологических режимов проектирования технологий на базе совмещенных процессов обжима с утонением. На рис. 4 и 5 представлены зависимости, показывающие влияние данных параметров на силу при обжиге с утонением элемента заготовки.

Полученные зависимости позволяют выявить характер влияния коэффициента обжима и утонения на силу процесса, что может быть полезно при проектировании технологий холодного обжима с утонением краевого элемента заготовки.

По результатам исследований выявлено, что наибольшее влияние на силу деформирования оказывает совокупность коэффициентов вытяжки и утонения. Влияние остальных параметров технологии незначительно.

Получены данные, позволяющие установить комплексное влияние наиболее важных

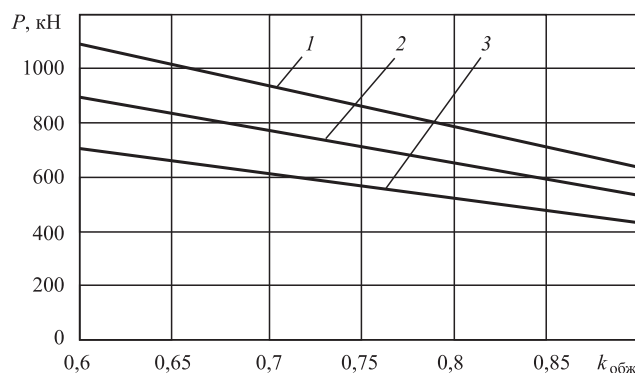


Рис. 4. Зависимости силы P от коэффициента обжима $k_{обж}$:
 1 - $k_{ут} = 0,8$; 2 - $k_{ут} = 0,9$; 3 - $k_{ут} = 1$

технологических параметров процесса на силы деформирования.

Построены вторичные математические модели, которые возможно использовать непосредственно при назначении технологических режимов.

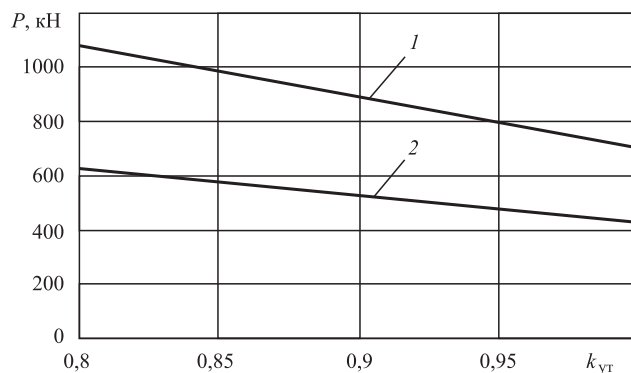


Рис. 5. Зависимости силы P от коэффициента утонения $k_{ут}$:
 1 - $k_{обж} = 0,6$; 2 - $k_{обж} = 0,9$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пасынков А.А., Аккуратнова А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния и возможностей формоизменения тонкостенной трубной заготовки из сплава ВТ14 при ее раздаче в изотермических условиях // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2017. Вып. 9. С. 286–290.

2. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. № 2. С. 74–78.

3. Оценка влияния геометрии инструмента на силовые параметры совмещенного процесса вытяжки

и отбортовки / В.И. Трегубов, С.Н. Ларин, А.А. Пасынков, Г.А. Нуждин // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 7, № 4. С. 165–167.

4. Грязев М.В., Ларин С.Н., Черняев А.В. Предельные возможности формообразования при обжиме трубной заготовки в матрице конической формы // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2016. Вып. 7. С. 3–8.

*Сергей Николаевич Ларин, д-р техн. наук,
mpf-tula@rambler.ru;*

*Валерий Иванович Платонов, канд. техн. наук;
Павел Витальевич Романов*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

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

ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU

А.В. Мартюгин (ООО "Центр обслуживания бизнеса", г. Набережные Челны),
И.М. Володин (Липецкий государственный технический университет)

Применение нейросетей для совершенствования технологии штамповки поковок коленчатых валов для обеспечения их балансируемости

Представлены результаты использования нейросети для анализа балансируемости поковки коленчатого вала Р4 с использованием элементов систем цифрового производства на основе 3D-параметрической оценки параметров дисбаланса поковки в зависимости от ключевых параметров поковки и процесса горячей объемной штамповки. Для аппроксимации результатов исследований применена специально созданная и обученная нейросеть. На основе анализа определены границы ключевых параметров поковки коленчатого вала Р4. Изменены технологический чертеж поковки и в штамповая оснастка. Решение внедрено в производство.

Ключевые слова: коленчатый вал; технологический процесс; штамповка; поковка; дисбаланс и балансировка поковок; аппроксимация; нейросеть.

The using results of neural network to analyze the balancing of R4 crankshaft forgings using elements of digital production systems based on 3D parametric evaluation of forging imbalance parameters depending on the keyword parameters of the forging and the hot die forging process are presented. Specially created and trained neural network is used to approximate the results of the researches. The boundaries of keywords parameters of R4 crankshaft forgings are determined based on the analysis. The technological drawing of the forging and all stamping tooling are changed. The solution is implemented into production.

Keywords: crankshaft; technological process; stamping; forging; forging imbalance and balancing; approximation; neural network.

Введение. В соответствии с современными требованиями системы менеджмента качества к технологическим процессам [1, 2] предъявляются высокие требования для получения высококачественной продукции с одновременным повышением эффективности производства. Требуется более расширенное использование современных цифровых технологий, в том числе и в заготовительных переделах машиностроительного сектора экономики, так как поставщик продукта должен обеспечить требуемое качество еще на этапе подготовки производства и выпуска опытно-промышленных партий с последующими серийными поставками [3].

В ПАО "КАМАЗ" при локализации (импортозамещении) заготовок для нужд отечественного потребителя предпринята попытка решить с помощью элементов систем цифрового производства: специальной программы ЭВМ с использованием нейросети для анализа балансируемости (требование по ограничению исходного дисбаланса) поковки коленчатого вала Р4.

В отечественной и зарубежной литературе обеспечению балансируемости коленчатого

вала на этапе изготовления поковки не уделено должного внимания, как и взаимосвязи горячей объемной штамповки (ГОШ) и механической обработки для обеспечения условий балансировки. Эти два процесса рассмотрены отдельно, при этом вся информация по теме относится к балансировке изделий механическим способом. Например, Renault для оптимизации балансировки занимается измерением геометрии с использованием 3D-оптических (или бесконтактных) систем сканирования [4] с использованием систем оцифровки [5–7].

Поковки коленчатого вала (рис. 1) штампуются из стали 38MnVS6 на автоматической ковочной линии, включающей в себя ковочные вальцы RWW-3, ковочный клиновой пресс KSP-1200 силой 1200 МН, обрезной кривошипный пресс ADWP-125 силой 125 МН, выкрутной пресс НКVM-18 (не используется в этом технологическом процессе), гидравлический пресс HWP-160 силой 160 МН для горячей правки.

Технология включает в себя нагрев исходных заготовок диаметром 150 мм в индукционном нагревателе до 1250...1280 °С; вальцовку

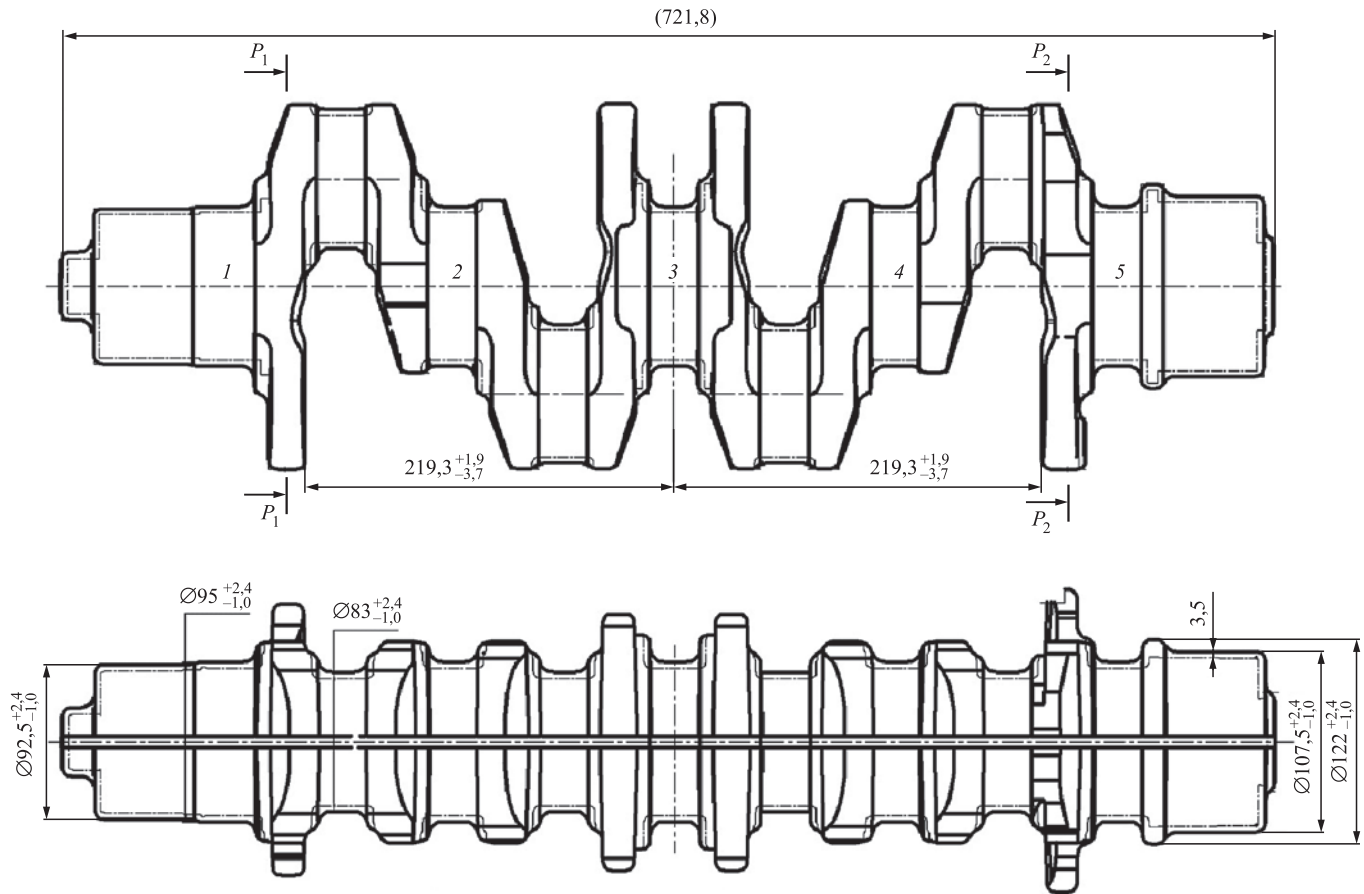


Рис. 1. Эскиз поковки коленчатого вала Р4 с ее ключевыми параметрами:

P_1-P_1 , P_2-P_2 — плоскости балансировки вала при механической обработке; допускаемое смещение по поверхности разреза штампов до 1,0 мм; допускаемый остаточный облой до 1,4 мм; допускаемая изогнутость коренной шейки 3 относительно коренных шеек 1 и 4 до 1,2 мм

исходной заготовки в два прохода; штамповку поковки в три перехода (гибка, предварительный и окончательный переходы формообразования); обрезку облоя напровал; горячую правку в двух взаимно перпендикулярных плоскостях за два перехода с поворотом поковки на 90° при перемещении ее из ручья в другой ручей. При штамповке применяли графитосодержащую технологическую смазку "Синтезол-75" отечественного производителя.

Основная проблема при внедрении технологического процесса — обеспечение балансировки поковок при механической обработке (брак по избыточному дисбалансу детали более 15 % от партии поковок), существенное рассеивание дисбаланса в партии поковок внутри границ допусков *ключевых параметров поковки* (КПП), указанных в ГОСТ 7505—89, не позволяет держать в управляемом состоянии дисбаланс в рамках допустимых значений.

Современные методы имитационного моделирования технологических процессов и работы оборудования позволяют прогнозировать

производство повышенной точности методами обработки давлением [8—10]. Поэтому было принято решение об использовании математических моделей для исследования распределения дисбаланса в поковках при изменении ключевых параметров поковки.

Методы исследования базировались на основе сквозного моделирования и анализа процесса ГОШ, параметрической 3D-модели поковки в среде Siemens NX, авторского программного обеспечения (ПО), а также открытого ПО для анализа данных и средств по работе с нейросетями [11]. Были разработаны модель детали с виртуально обработанными поверхностями с учетом базирования на первых операциях механической обработки и ПО для определения дисбаланса детали по двум плоскостям балансировки в зависимости от изменяемых КПП, определенных в результате сквозного анализа процесса ГОШ.

Данные по дисбалансу, полученные с помощью параметрической модели, были сопоставлены с физическими экспериментами, прове-

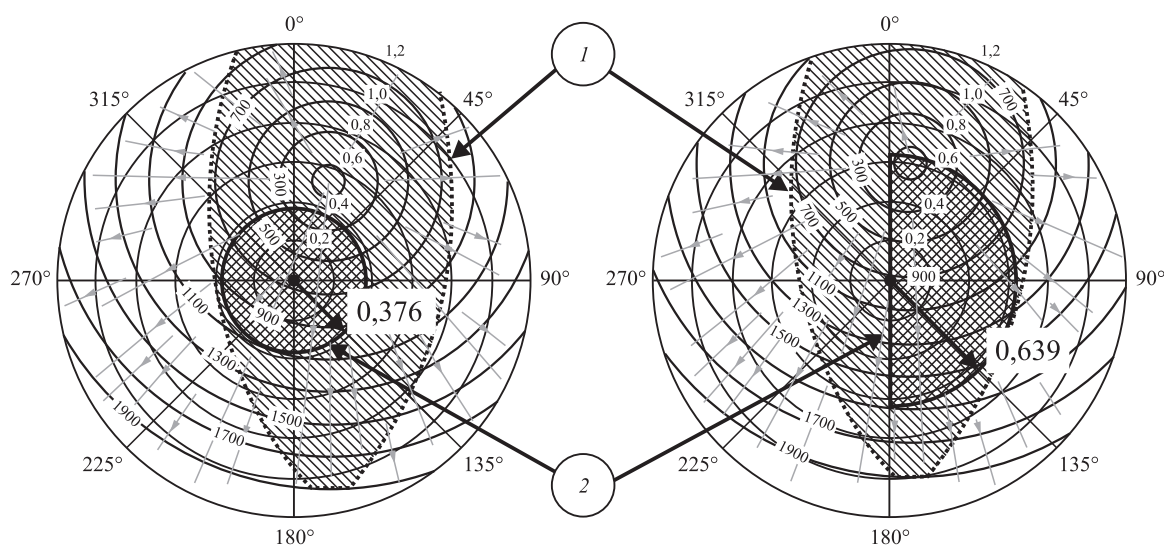


Рис. 2. Пример графика зависимости функции дисбаланса:

1 — граница допустимого дисбаланса поковки, установленного при имитационном моделировании; 2 — границы (круг, полукруг рассеивания) допустимой изогнутости при соблюдении допустимого дисбаланса; сферические линии — дисбаланс с шагом 200 г·см; радиальные линии — углы дисбаланса с шагом 45°

денными при изготовлении опытно-промышленных партий. Затем параметрическую модель использовали для получения базы данных значений дисбаланса в зависимости от КПП. Анализ данных и нахождение границ КПП, в рамках которых обеспечивается условие балансируемости, потребовали определения вектор-функции дисбаланса (величина и направление).

Область допустимых значений дисбаланса поковки, в которой обеспечивается окончательная балансировка коленчатого вала, найдена исходя из технологических допусков ГОШ и механической обработки. Сопоставление области допустимых значений дисбаланса и соответствующих значений КПП при рассчитанном дисбалансе дает возможность найти максимально допустимые значения КПП, влияющие на окончательную балансировку [12].

На рис. 2 приведен пример зависимости функции дисбаланса в одной плоскости балансировки (P_1-P_1) от значения одного из КПП — вектора изогнутости при константных значениях остальных ключевых параметров (допуск на высотные размеры поковки и смещение по разъему штампов).

Обеспечение балансируемости поковки. Для обеспечения качества продукта и требований потребителя все балансируемые заготовки должны находиться внутри области допустимого дисбаланса (см. рис. 2, а, область 1). По графику рис. 2 можно визуально оценить

максимальное значение изогнутости, построив окружность с центром в начале координат, которая бы касалась границы зоны допустимого дисбаланса, и найти максимально допустимое значение изогнутости в любом направлении (см. рис. 2, а, область 2). Эти операции рассчитаны численным путем для всех сочетаний ключевых параметров и найдены максимальные допустимые значения для КПП, обеспечивающие балансируемость коленчатого вала Р4.

На графике рис. 2 линии равных значений дисбаланса (сферические линии с шагом 200 г·см) и линии направления дисбаланса (радиальные линии с шагом 45°) аппроксимированы библиотекой визуализации данных Matplotlib и представлены в виде сетки координат для наглядности расположения области допустимого и ограниченного дисбаланса поковки.

Данные для анализа получены из параметрической модели поковки в среде Siemens NX с разрешением 0,1 мм по величине и 1° по направлению изогнутости, что соответствует шкале деления измерительного универсального инструмента, используемого в производстве.

В случае ограничения изогнутости только в одну сторону, обеспеченную технологическим процессом и возможностями производства, заданная точка центра радиуса области разброса допустимой изогнутости будет найдена для определенного сектора и иметь кардинально иное положение (например, как на рис. 2, б).

Для увеличения точности выбора границ КПП, обеспечивающих балансируемость, принято решение аппроксимировать исходные данные, полученные из параметрической модели поковки в среде Siemens NX. Так как свойство балансируемость может иметь только два варианта "да" и "нет", то можно предположить, что все варианты геометрии поковки можно классифицировать по этому свойству и найти значение границ ключевых параметров поковки, обеспечивающие балансируемость. Однако такой подход требует перепроверки правильности аппроксимации пограничных значений по всей протяженности границы допустимого дисбаланса, а значит и сбора дополнительных данных в среде Siemens NX. Проблемой такого подхода могут стать изменения в технологических параметрах на механообрабатывающей линии или изменениях в конструкторской документации на деталь.

Функция вектора дисбаланса для коленчатого вала представлена в двух плоскостях (четыре значения), переменные — это КПП для данной конструкции коленчатого вала: вектор изогнутости, смещение по разьему штампов и допуск на высотные размеры поковки. Готового решения подобной задачи аппроксимации не найдено, поэтому было принято решение построить нейросеть с использованием библиотеки Keras и TensorFlow. Для более полного исследования параметры нейросети подбирались в режиме случайного поиска с заранее заданными границами варьирования параметрами (hyperparameter) [13] с помощью Keras Tuner.

Общая схема нейросети представлена на рис. 3. Число нейронов в каждом слое и общее число слоев N варьировалось функцией случайного поиска из библиотеки Keras Tuner. Число входных нейронов X и выходных нейронов Y на каждом шаге варьирования оставалось неизменным.

Исходя из нелинейного характера связи между КПП, направлением и дисбалансом по каждой из плоскостей балансировки, выбор типов нейронов был представлен следующим набором функций активации: selu [14], elu [15], tanh, softmax, sigmoid, exponential, relu [16], sqnl [17]. Согласно исследованиям [18], для аппроксимации можно эффективно использовать глубокие нейросети и при этом уменьшить веса связей. В результате проведенного предварительного анализа число совмещенных слоев было огра-

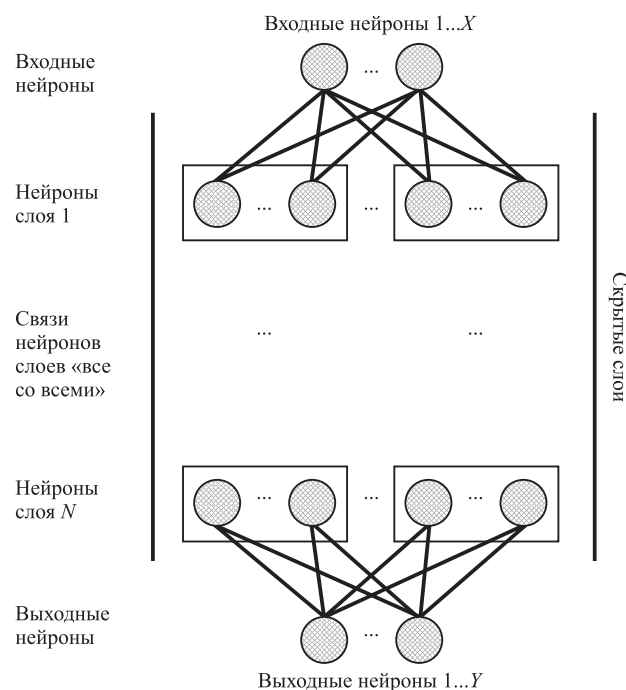


Рис. 3. Общая схема нейросети для аппроксимации данных, полученных по результатам работы программы анализа балансируемости

ничено тремя ($N \leq 3$), дальнейшее увеличение слоев не давало значительного прироста качества аппроксимации, при этом значительно замедляя обучение нейросети.

Для исключения эффекта переобучения выбирались такие конфигурации скрытых слоев, чтобы число нейронов в каждом слое было минимально необходимым для аппроксимации данных с первоначально принятой ошибкой (50 г·см). Так как исследования по аппроксимации нейросетью функции-вектора дисбаланса были проведены впервые, потребовались проверочные данные с мелким шагом (шаг для всех параметров равен цене деления измерительного инструмента) и во всем диапазоне технологически возможных значений ключевых параметров.

В целях исследования возможности значительно уменьшить ресурсоемкую выборку в Siemens NX обучение нейросети проводилось на 10 % из полученных данных, 90 % данных использовались для проверки качества аппроксимации. Значение функции потерь также вычислялось на данных, которые не использовались в текущей эпохе обучения. Каждый вариант нейросети сохранялся с показателями качества обученной модели (относительная и абсолютная ошибка величины дисбаланса). Данные из Siemens NX для построения графиков не участвовали в обучении нейросети.

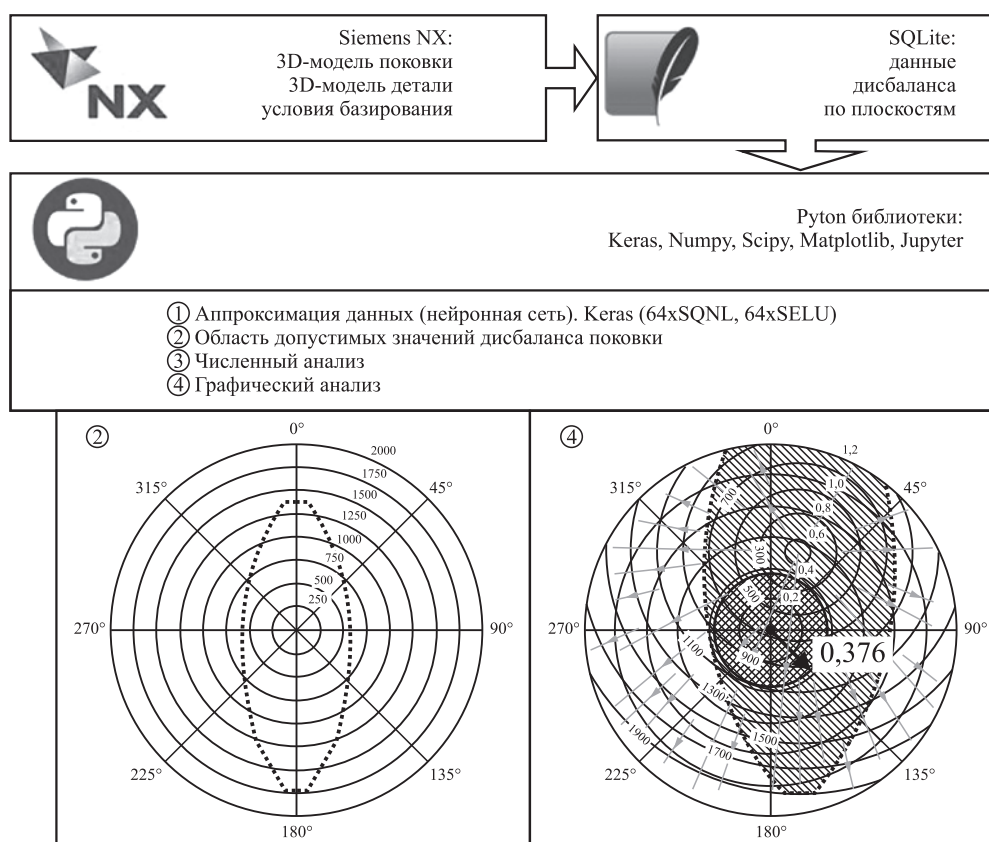


Рис. 4. Схема программного обеспечения для анализа балансируемости поковки

Для окончательного выбора конфигурации нейросети была сформирована таблица с качественными показателями и отсортирована в порядке возрастания максимальной абсолютной ошибки аппроксимации. Причем, если качество аппроксимации нейросети с меньшим числом нейронов не уступало (относительная ошибка не более 1 %) качеству нейросети с большим числом, то меньшая нейросеть перемещалась выше в итоговой таблице. По результатам отбора была выбрана конфигурация нейросети с максимальной абсолютной ошибкой 1,9 г·см, удовлетворяющая требованиям задачи. Полная схема ПО для анализа балансируемости поковки и итоговые параметры нейросети приведены на рис. 4. Представленное ПО используется как инструмент анализа в усовершенствованной методике проектирования технологических процессов ГОШ коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами [19, 20].

Изменение технологии штамповки. По результатам проведенных исследований и расчетов для коленчатого вала Р4 сформированы диапазоны ключевых параметров поковки для обеспечения геометрической точности поков-

ки [12], обеспечивающей успешную балансировку детали. Сопоставление требований чертежа поковки, выполненного по ГОСТ 7505—89 (см. рис. 1) и требований обеспечения геометрической точности для выполнения требований механической обработки и ограничения дисбаланса поковки в заданных границах указаны в таблице.

Использование цифровых методов исследования позволило установить границы следующих ключевых параметров: допуск на высотные размеры поковки, изогнутость и смещение по разъему штампов. Границы линейных размеров по противовесам (с учетом остаточного облоя) определены технологическим процессом механической обработки для коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами.

Для расширения допуска на ключевой параметр изогнутость были внедрены технологические решения (дополнительное ограничение допуска на высотные размеры поковки, изменение конструкции штампов, снижающих смещение, изменение геометрии калибровочного ручья для обеспечения перегиба в сторону, противоположную обрезке облоя).

Границы ключевых параметров для обеспечения геометрической точности поковки Р4

Параметр	Чертеж поковки по ГОСТ 7505—89	Требования технологического процесса для обеспечения геометрической точности
Допуски на размеры крайних противовесов, мм	+1,9/−3,7 +3,7/−1,9	±2, с учетом остаточного облоя
Допуски на размеры средних противовесов, мм	+1,3/−2,7 +3,0/−1,5	
Допуск на высотный размер поковки, мм	+2,4/−1,0	+0,8
Изогнутость, мм	До 1,2	До 0,5
Смещение, мм	До 1,0	До 0,4
Остаточный облой, мм	До 1,4	До 1,4, кроме мест ускоренного движения инструмента при механической обработке

Для ограничения смещения по разьему штампа в окончательном переходе штамповки введены по углам вертикальные замки (рис. 5). Изображенная на рис. 5 конструкция штампа обеспечивает ограничение смещения в пределах зазоров между элементами замков. Из-за необходимости установки тепловых зазоров между верхней и нижней половинами штампа установлен гарантированный зазор 0,2 мм на сторону, в этом случае, ограничение смещения по разьему штампов, с учетом допусков на изготовление оснастки, не более 0,4 мм. По вершинам замков предложены заходные фаски, геометрические параметры фасок вы-

браны таким образом, чтобы взаимодействие замков по рабочим поверхностям (вертикальные плоскости) начиналось гарантированно раньше, чем соприкосновение верхнего штампа с полуфабрикатом.

Существенным фактором качества поволоков коленчатых валов и стабильности геометрической точности поволоков является значение закрытой высоты ковочного штампа, определяющей высотные размеры полуфабриката поковки. Недостаточная высота полуфабриката (заниженная закрытая высота ковочного штампа) приводит к тому, что при горячей калибровке не создается необходимой объ-

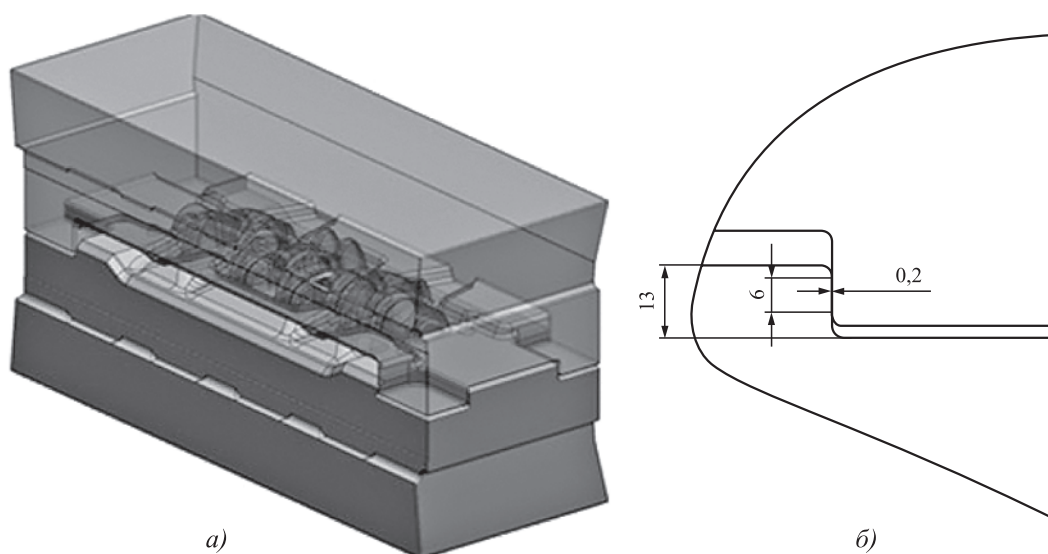


Рис. 5. Штамп с вертикальными замками против смещения по разьему штампов:
а — 3D-изображение штампа в нижней точке хода ползуна прессы, штамп замкнут по четырем вертикальным выступам-замкам; *б* — параметры вертикального замка штампа: высота замка 13 мм, рабочая часть 6 мм, зазор между верхней и нижней частью штампа 0,2 мм

емной деформации по сечениям коренных и шатунных шеек, процесс правки вала будет нерезультативный [21]. Завышенная высота полуфабриката (завышенная закрытая высота штампа) приводит к излишней деформации поковки при горячей калибровке и удлинению поковки сверх установленного допуска, обеспечивающего успешную механическую обработку без поломки режущего инструмента [20].

Для горячей калибровки поковки используется гидравлический пресс со смыкающейся по разьему штамповой оснасткой. Этим достигается максимальная жесткость геометрических параметров штампуемого изделия. Правка осуществляется в два перехода с поворотом полуфабриката вокруг оси на 90° . Для придания геометрической точности изделию в штамповой оснастке для горячей правки реализована схема локальных деформаций полуфабриката поковки, которая позволила, наряду с ограничениями по высотным размерам поковки, обеспечить изогнутость поковки не более 0,5 мм без удлинения поковки при правке.

В первом переходе горячей правки (рис. 6, а) для исправления изогнутости поковки, образующейся при обрезке облоя, полуфабрикат перегибается в сторону, противоположную вектору изогнутости полуфабриката. Рабочими поверхностями штампа стали поверхности, контактирующие с крайними (базовыми) коренными шейками и цапфами, а также поверхность гравюры средней коренной шейки, по которой определяется параметр изогнутости поковки. В направлении перегиба поковки в гравюре верхней половины штампа по средней коренной шейке выполнено освобождение, в нижней части правочного штампа рабочая часть гравюры поднята на величину предполагаемой изогнутости полуфабриката после обрезки облоя.

Второй переход калибровки осуществляют исходя из условия минимальной деформации, при котором коренные шейки полностью охвачены пластической деформацией [21]. Рабочими частями гравюр являются гравюры для калибровки коренных шеек, крайних и центральной (рис. 6, б).

Проведенные изменения технологического процесса и штамповой оснастки показали свою

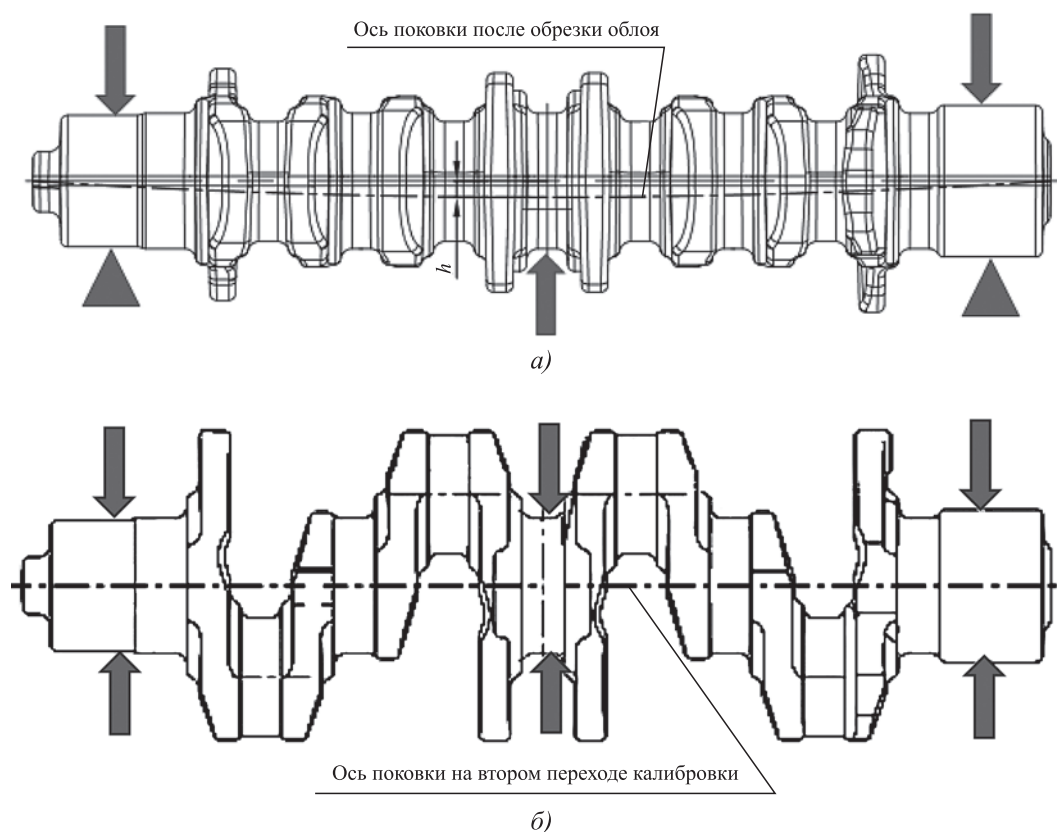


Рис. 6. Схемы деформации поковки при горячей правке в первом (а) и втором (б) переходе (стрелками показаны зоны и направление деформирования поковки)

эффективность. Измерения поковок при периодическом контроле (через каждые 100 поковок) показали, что при соблюдении установленных границ КПП по высотным размерам (+0,8 мм) и ограничении смещения по разьему штампа (не более 0,5 мм) стабилизирована изогнутость поковки в интервале 0,2...0,5 мм, улучшена балансировка изделий, исключены аварийные ситуации вследствие врезания в тело поковки инструмента при ускоренном его движении. Уровень брака снижен до 1,2 %.

Заключение. Выполненные исследования показали возможность успешного применения нейросетей для аппроксимации функции-вектора дисбаланса, необходимой для определения границ КПП, в которых обеспечивается балансируемость коленчатых валов Р4 кузнечного производства.

Установлена степень значимости КПП поковки: изогнутость оказывает наибольшее влияние, а смещение по разьему штампа и допуск на высотные размеры поковки влияют в меньшей степени. Показана возможность в рамках использования описанного в статье цифрового метода до 10 раз сократить ресурсоемкую выборку данных из параметрической модели в Siemens NX.

Определены конкретные значения границ ключевых параметров ГОШ, в которых обеспечивается балансируемость конечного изделия в автоматическом режиме при механической обработке. Решение данной задачи позволило на основе сквозного анализа технологии спроектировать технологический процесс и штамповую оснастку для поковок коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами и внедрить технологический процесс в производство, уровень брака при этом сократился с 15 до 1,2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ISO 9001.** Quality management systems — Requirements. 15.09.2015. URL: <https://www.usurt.ru/uploads/main/01z/56fd69e2f3f24/ISO%209001%202015.pdf> (дата обращения: 23.08.2020).
2. **IATF 16949.** Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. 01.10.2016. URL: <http://www.icgrp.ru/docs/list/standards/iso-ts-16949/16949-tkb> (дата обращения: 10.02.2019).
3. **Сосенушкин Е.Н.** Прогрессивные процессы объемной штамповки. М.: Машиностроение, 2011. 479 с.
4. **Guarato A.Z.** Metrologie 3D de pieces de formes complexes par moyens optiques. Une application a l'équilibrage de vilebrequins / Engineering Sciences. supérieure de Cachan. French: ENS Cachan, 2013.
5. **Contri A., Bourdet P., Lartigue C.** Quality of 3D digitized points obtained with non-contact optical sensors // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2002. Vol. 51 (1). P. 443—446.

6. **Mehdi-Souzani C.** Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité: Thèse de Doctorat, ENS Cachan, 30 juin 2006.

7. **Nicolas Audfray, Charyar Mehdi-Souzani, Claire Lartigue,** Qualification et Performances des Systèmes de mesure Optiques QualiPSO, Journée 3DSC 2012, Cachan.

8. **Кельгон В., Лой А.** Имитационное моделирование. Классика CS. СПб.: Питер: Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.

9. **Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М.** Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. 644 с.

10. **Телегин В.В.** Построение имитационных моделей в задачах исследования динамики механических систем // Фундаментальные исследования. 2014. № 12 (часть 10). С. 2125—2130.

11. **Volodin I.M., Martyugin I.M.** A new resource-saving method of forming crankshafts heavy vehicles // Information materials are prepared for involvement of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the Hannover Messe 2014. Ганновер, ФРГ, 2014. С. 16—18.

12. **Мартюгин А.В., Володин И.М.** Влияние ключевых параметров штамповки и первых операций механической обработки на балансировку коленчатого вала // Автомобильная промышленность. 2020. № 2. С. 30—37.

13. **Bergstra J., Bengio Y.** Random search for hyperparameter optimization // Journal of Machine Learning Research. 2013. 13. 281—305.

14. **Self-Normalizing Neural Networks/ G. Klambauer; T. Unterthiner, A. Mayr, S. Hochreiter** // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. 30. arXiv:1706.02515. Bibcode: 2017arXiv170602515K.

15. **Clevert D.-A., Unterthiner T., Hochreiter S.** Fast and Accurate Deep Network Learning by Exponential Linear Units (ELUs). (2015-11-23). arXiv:1511.07289 [cs.LG].

16. **Nair V., Hinton G.E.** Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines // 27th International Conference on International Conference on Machine Learning, ICML'10. USA: Omnipress, 2010. P. 807—814.

17. **Wurola A., Patel N.** SGNL: A New Computationally Efficient Activation Function // 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Rio Rio de Janeiro. Brazil, IEEE. P. 1—7.

18. **Xia Liu.** Approximation smooth and sparse functions by deep neuralnetworks without saturation. 2020. arXiv:2001.04114v1 [cs.IT].

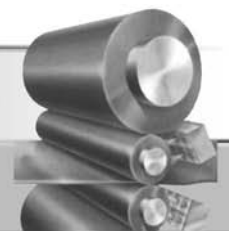
19. **Совершенствование** метода проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами / А.В. Мартюгин, И.М. Володин, А.И. Володин, Г.Ф. Биктимирова // Известия Тульского государственного университета. 2020. № 6. С. 364—371.

20. **Мартюгин А.В., Володин И.М.** Снижение влияния деформации при обрезке облоя на геометрическую точность и дисбаланс поковок коленчатых валов // Colloquium-journal. 2019. № 26 (50-2).

21. **Володин И.М.** Моделирование процессов горячей объемной штамповки. М.: Машиностроение, 2006. 253 с.

Алексей Викторович Мартюгин,
avmartugin@gmail.com;

Игорь Михайлович Володин, д-р техн. наук



УДК 621.774.3

DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-12-557-559

А.А. Филатов (АО АХК "Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика А.И. Целикова", г. Москва), **О.В. Соколова, Е.В. Лагошина** (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Повышение качества поверхности прецизионных тонкостенных труб

Рассмотрены причины возникновения осевых сил при холодной периодической прокатке в зоне деформации. Приведен оригинальный способ решения минимизации осевых сил для повышения производительности станов и качества готовой продукции.

Ключевые слова: холодная периодическая прокатка труб; осевые силы; привод клетки.

The causes for the occurrence of axial forces during the cold periodic rolling in the deformation zone are considered. Original method for solving of the axial forces minimization to increase the productivity of mills and the quality of the finished product is presented.

Keywords: cold periodic rolling; axial forces; stand drive.

Вопросы повышения производительности и качества холоднодеформированных прецизионных труб остаются актуальными и в настоящее время. Они направлены на совершенствование технологии прокатки, оптимизацию технологических параметров и модернизацию станов холодной периодической прокатки труб валкового и роликового типов (ХПТ и ХПТР) [1].

По мере накопления и анализа данных при эксплуатации станов ХПТ была выявлена одна из основных причин, влияющих на качество прецизионных тонкостенных труб малого диаметра — это разнонаправленные осевые силы, возникающие по длине хода клетки между патроном подачи и линией рабочей клетки. На осевые силы оказывает влияние несовпадение действительного катающего радиуса и радиуса начальной окружности ведущей шестерни, т.е. принудительного катающего радиуса [2].

Ранее были предложены различные способы снижения осевых сил: применение шестерни с дробным числом зубьев, привод вращения валков клетки с механизмом перемещения зубчатых реек, эксцентриковая установка ведущих шестерен, некруглые ведущие шестерни, станы ХПТ со свободным обратным ходом клетки, станы с рычажным механизмом перемещения клетки и др.

Комплекс работ по минимизации осевых сил проведен в АО АХК "ВНИИМЕТМАШ" при участии МГТУ им. Н.Э. Баумана. Исследования показали, что самым простым и эффективным является использование в приводе рабочей клетки рейки с переменным шагом зубьев. Предполагали, что положительный результат можно получить за счет того, что при переменном шаге зубьев рейки возможно достигнуть равенства отношения линейной скорости перемещения клетки к угловой скорости вращения валка в точке приложения действительного катающего радиуса, что позволило бы обеспечить отсутствие осевых сил при прокатке [3].

Однако пробная прокатка не дала полного решения проблемы. Возникновение значительных осевых сил свидетельствует о неточности расчета рейки с переменным шагом. Основным параметром при расчетах является катающий радиус, поэтому необходимо было проверить методику расчета этого параметра.

Для более подробного изучения причин возникновения разнонаправленных осевых сил проведено экспериментальное исследование на промышленном стане ХПТ 10-45 с классическим приводом (шестерня—рейка). Цель исследова-

ния — определение характера распределения и величин осевых сил, возникающих на заднем конце заготовки при прокатке труб диаметром менее 16 мм. Материал заготовки — сталь 08X18H10T.

Так как ранее вопросу измерения осевых сил на заднем конце заготовки не уделялось большого внимания, необходимо было решить, где в линии стана и в какой конструкции необходимо установить измерительное устройство (месдозу). Месдоза должна располагаться в линии стана таким образом, чтобы измерять действительные значения осевых сил, возникающих при прокатке. Также необходимо учитывать, что измерительное устройство должно вписываться в конструкцию стана и не изменять технологию производства прецизионных труб.

Еще одна трудность заключалась в том, что пробную прокатку проводили на промышленном прокатном стане ХПТ, т.е. никакие дополнительные изменения в конструкции оборудования линии стана были не допустимы. Месдозу необходимо расположить в линии как отдельный сборочный узел, не мешая ходу стабильного процесса прокатки, протеканию вспомогательных операций, при этом она должна максимально близко располагаться к рабочей линии, так как патрон подачи заготовки компенсирует осевые силы.

Проведя анализ технологии прокатки труб на станах ХПТ и расположения оборудования в линии стана, месдозу установили между прокатываемой трубой и патроном подачи заготовки промежуточной секции. Один конец месдозы был зажат в патроне подачи, а другой — с помощью гайки соединен с трубой (рис. 1).

Предполагали, что в начале хода клетки будут растягивающие осевые силы на заднем конце заготовки, а в конце — сжимающие. Однако в отличие от общепринятого согласно теории периодической прокатки характера распределения осевых сил на заднем конце заготовки наблюдались преимущественно сжимающие напряжения.

То же явление наблюдали при прокатке по различным маршрутам. Осевые силы для разных технологических режимов прокатки, разных маршрутов имели одинаковый характер распределения осевых сил. Косвенно наличие сжимающих осевых сил было подтверждено тем, что во время прокатки наблюдали откат патрона подачи.

Самый неожиданный результат был получен при прокатке труб по маршруту $\varnothing 20,0 \times 1,6 \rightarrow \varnothing 10,40 \times 0,8$: сервопривод подачи показывал повышение нагрузки на 180 %, а труба-заготовка сильно изгибалась в зоне между патро-

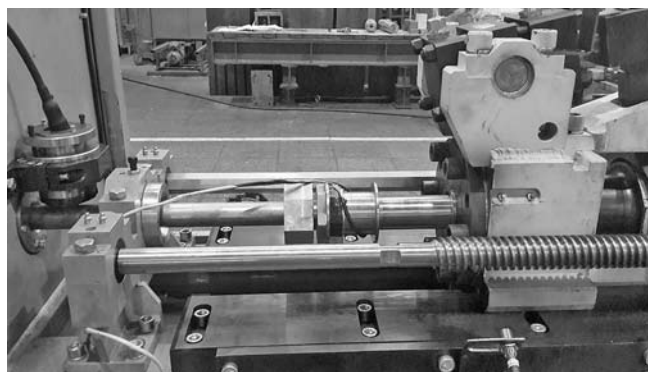


Рис. 1. Расположение месдозы в линии стана ХПТ 10-45

ном подачи и линией рабочей клетки. Причину такого брака можно объяснить значительным увеличением осевых сил, что, вероятно, связано с расчетом привода клетки стана ХПТ, а именно с неверным определением катающего диаметра валков.

Для определения направления осевых сил необходимо рассмотреть связь между причиной возникновения осевых сил и наличия несогласования скоростей металла и окружной скорости калибра рабочих валков, связанных с несовпадением значений действительного и принудительного катающих радиусов.

По длине хода клетки существует точка, в которой выбранное значение радиуса ведущей шестерни равно действительному катающему радиусу. Представим графически, как изменяются эти значения по всей длине хода клетки. Согласно данным на рис. 2 в начале очага деформации реальное значение катающего радиуса меньше выбранного (зона I), а в его конце — больше (зона II), что оказывает большое влияние на осевые силы. Для того чтобы узнать, как это может отразиться на возникающих при этом осевых силах, рассмотрим эпюру скоростей точек ручья валка для каждого из этих случаев.

Для зоны I принятый катающий радиус будет больше действительного, это значит, что на эпюре скоростей точку равенства скоростей принудительно увеличиваем $O \rightarrow O'$ (рис. 3, а). В результате скорость нижних точек калибра будет меньше значения скорости, соответствующей этой точке калибра при действительном катающем радиусе. Вследствие чего возникают растягивающие осевые силы.

Значение растягивающих осевых сил будет тем меньше, чем меньше будет разница между принудительным и действительным катающими радиусами. Растягивающие осевые силы могут при-

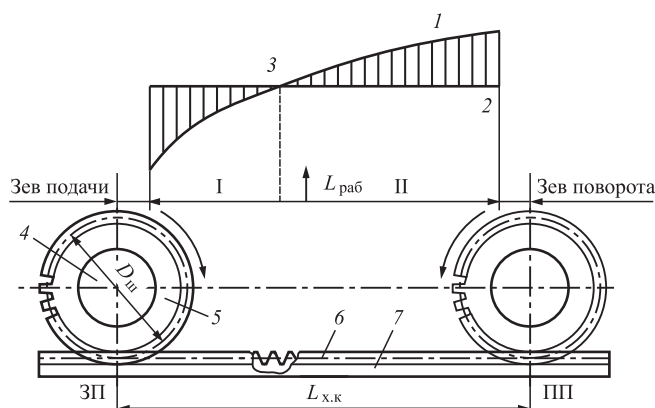


Рис. 2. Схема изменения действительного и принудительного катающих радиусов по длине хода клетки:

I — зона растягивающих осевых сил; II — зона сжимающих осевых сил; 1 — изменение значения действительного катающего радиуса; 2 — значение радиуса ведущей шестерни; 3 — точка равенства действительного катающего радиуса и радиуса ведущей шестерни; 4 — шейка валка; 5 — ведущая шестерня; 6 — линия зацепления; 7 — зубчатая рейка; 3П — заднее положение клетки; ПП — переднее положение клетки; $L_{x,k}$ — длина хода клетки; $L_{раб}$ — длина рабочей зоны профиля калибра; $D_{ш}$ — диаметр шестерни

вести: к поступлению в очаг деформации дополнительного количества металла (дополнительная подача), разводу торцов смежных заготовок.

Для зоны II на эпюре скорости нижних точек калибра будет больше значения скорости, соответствующей этой точке калибра при действительном катающем радиусе (рис. 3, б). Это приводит к возникновению сжимающих осевых сил. Сжимающие осевые силы могут привести к врезанию друг в друга торцов трубы, образованию гофров, изгибу заготовки и строжня оправки. Таким образом, на участках, где заданное значение катающего радиуса больше мгновенного, возникают растягивающие осевые силы, а где меньше — сжимающие. В каждый момент времени эпюры скоростей будут изменяться и для каждого следующего сечения разница значений действительного и принудительного катающих радиусов также изменится,

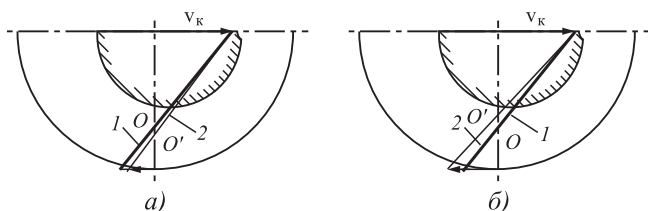


Рис. 3. Эпюры скоростей точек ружья валка:

1, 2 — прямая распределения скоростей для действительного и заданного значения катающего радиуса соответственно

что приведет к соответствующему изменению осевых сил по величине и направлению.

Однако проведенный эксперимент показал, что при прокатке на обжимной зоне по длине очага деформации были только сжимающие осевые силы. Из этого следует, что при расчете катающего радиуса его значение в начале хода клетки было занижено.

На основании этого заключения и полученных экспериментальных данных была скорректирована методика расчета катающего радиуса [4].

Таким образом, предложен новый привод клетки стана ХПТ, в конструкцию которого внесены изменения на основе скорректированной теории расчета катающего радиуса валков, что позволило минимизировать осевые силы на заднем конце заготовки.

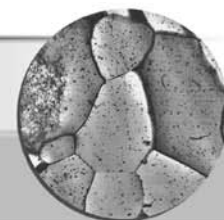
В настоящее время новый привод стана внедрен в промышленную эксплуатацию, что позволило сократить количество брака по продольной разностенности на 20 % и поперечной — на 15 %, а также улучшить качество внутренней поверхности трубы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент № 2720330 Российская Федерация, МПК В21В 13/18 (2006.01). Рабочая клетка стана холодной прокатки труб: № 2019108288; заявл. 22.03.2019; опубл. 28.04.2020 / Пеньков Н.С., Есаков А.В., Леванович С.Н., Лунина Т.П.
2. Патент № 2694440 Российская Федерация, МПК В21В 13/18 (2006.01). Трехвалковая клетка стана холодной прокатки труб: № 20181350736; заявл. 05.10.2018; опубл. 15.07.2019 / Леванович С.Н., Есаков А.В., Пеньков Н.С.
3. Опыт внедрения способа прокатки труб с подачей и поворотом труб-заготовок при полном ходе клетки на станах холодной прокатки труб / А.А. Терещенко, А.П. Головченко, Я.В. Фролов, В.С. Дехтярев // Трубное производство. 2009. № 1. С. 63–64.
4. Соколова О.В., Лагошина Е.В. Производство прецизионных труб малого диаметра на станах периодической холодной прокатки труб // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18, № 2. С. 75–77.
5. Филатов А.А., Целиков Н.А., Лагошина Е.В. Модернизация зубчато-реечного привода стана холодной прокатки труб // Тяжелое машиностроение. 2015. № 10. С. 12–18.
6. Соколова О.В., Лагошина Е.В. Определение значения катающего радиуса при холодной периодической прокатке труб // Производство проката. 2019. № 8. С. 29–34.

Александр Андреевич Филатов, д-р техн. наук;
Ольга Вадимовна Соколова, канд. техн. наук,
olga55-55@bk.ru;

Елена Владимировна Лагошина, канд. техн. наук



УДК 621.791.18

DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-12-560-569

В.С. Пицык, Э.А. Дмитриев, В.И. Муравьев, Е.А. Старцев
(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)

Влияние температуры фазового превращения на эволюцию структуры физического контакта неразъемного соединения титанового сплава OT4-1 в образцах "втулка—вал"

Исследованы закономерности изменения микроструктуры, микротвердости, распределения легирующих элементов, плотности дислокаций в процессе холодной тугон посадкой с натягом 450 мкм и последующего теплового нагрева в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения в приконтактной области неразъемного соединения образцов "втулка—вал" из сплава OT4-1. Выявлен температурно-временной интервал фазового превращения ускоренных диффузионных процессов образования диффузионного неразъемного соединения сплава OT4-1, соответствующий нагреву в автовакууме при температуре 975...1000 °С с выдержкой от 20 до 60 мин.

Ключевые слова: неразъемные соединения; физический контакт; тугая посадка; сплав OT4-1; диффузия; микродюрометрия; пластические деформации; легирующие элементы.

The patterns in changes of microstructure, microhardness, distribution of alloying elements, dislocation density are studied during the cold tight interference fit of 450 microns and subsequent thermal heating in the temperature range of phase $\alpha \rightarrow \beta$ -transformation in the contact area of the permanent joint of the "bushing —shaft" samples made of OT4-1 alloy. The temperature-time interval of the phase pre-transformation of accelerated diffusion processes for the formation of diffusion OT4-1 alloy permanent joint corresponding to heating in autovacuum at temperature of 975...1000 °C with exposure time of 20 to 60 minutes is revealed.

Keywords: permanent joints; physical contact; tight fit; OT4-1 alloy; diffusion; microdurometry; plastic deformations; alloying elements.

Введение. Современные тенденции развития авиастроения предъявляют все более высокие требования к массогабаритным характеристикам конструкций планера и систем воздушного судна при сохранении высокой прочности в целях достижения требуемых летных и технических характеристик.

Авиастроение — первая отрасль, которая начала применять титан и сплавы на его основе. Данная группа материалов отвечает всем современным требованиям по созданию эффективного летательного аппарата — минимальный вес, высокие прочность и надежность, низкая стоимость обслуживания. Применение титановых сплавов при изготовлении элементов авиационной техники в ряде случаев позволяет получить экономию в весе от 15 до 25 %

по сравнению с использованием стальных элементов. Высокая стойкость к усталостным разрушениям обеспечивает повышение срока эксплуатации таких элементов на 25...35 % [1, 2].

Несмотря на преимущества титановых сплавов, общая масса элементов, изготовленных из данных сплавов, в летательном аппарате на сегодняшний день остается недостаточной из-за отсутствия универсальной эффективной технологии получения неразъемных соединений (НС).

В настоящее время при получении НС титановых сплавов в авиастроении получили распространение различные методы сварки плавлением и пайки, основной и главный недостаток которых — наличие гетерогенной области в зоне соединения, химический со-

став, физические и технологические свойства которой отличаются от основного металла. Данные методы получения НС помимо основного недостатка имеют целый ряд ограничений металлургического и технологического характера [3, 4]:

- необходимость подачи присадочного материала или припоя;
- необходимость специальной защиты зоны НС в момент его получения — подача газа или флюса;
- наличие зоны термического влияния;
- остаточные напряжения и деформации;
- высокая вероятность возникновения дефектов металлургического характера;
- необходимость перемещения заготовки или сварочной дуги;
- наличие переходной муфты, существенно увеличивающей вес соединения;
- значительные габаритные размеры используемого оборудования.

Таким образом, вопрос создания методов получения НС, исключающих образование гетерогенной зоны в соединении, металлургические дефекты и остаточные деформации, является актуальной задачей развития авиационной отрасли.

Наибольший интерес представляют методы диффузионной сварки. Однако применение традиционных методов затруднено в силу специфических условий термомеханического цикла получения НС. Необходимость проведения процесса получения НС в вакууме существенно ограничивает номенклатуру и габаритные размеры изготавливаемых деталей и существенно повышает их себестоимость. Несмотря на то, что традиционные методы диффузионной сварки позволяют получить НС с требуемой структурой и технологическими свойствами, а также исключают возникновение металлургических дефектов, их применение в большинстве случаев экономически неэффективно или технологически невозможно.

В основе работ [5—7] — использование традиционной схемы диффузионной сварки, основанной на одновременном наложении тепловых и деформационных полей в условиях вакуума.

Перспективны исследования [8—11] по применению различных переходных прослоек в качестве средства активации стадии физического контакта. Несмотря на получение положительных результатов, переходные прослойки

создают в приконтактном материале НС гетерогенную область со структурой, составом и свойствами, отличными от основного металла, что, как показал опыт эксплуатации летательного аппарата, является основной причиной разрушения НС.

Выполнены исследования [12—14] в области кинетики развития физического контакта при низкоинтенсивной диффузионной сварке и влияния технологических факторов, а также микроструктуры образцов на качество НС. В работах показано, что: использование образцов с равноосной мелкозернистой структурой глобулярного типа позволяет получить НС с прочностью равной или более высокой, чем у основного металла, а при использовании образцов с крупнозернистой пластинчатой структурой даже при оптимальных условиях — этого не происходит.

Известны [15—18] разработки новых технологических приемов получения НС в твердом состоянии титановых сплавов. Кинетика образования НС в данном случае приближена к традиционному методу диффузионной сварки, однако есть отличие — деформационное и тепловое поле накладываются не одновременно, как при традиционном методе, а последовательно: на первом этапе образование физического контакта НС за счет пластической деформации, на втором этапе образование диффузионного НС за счет теплового воздействия.

Цель работы — выявить влияние температурных условий фазового превращения на эволюцию структуры и распределение легирующих элементов в зоне напряженно-деформированного (натяг 450 мкм) физического контакта при образовании диффузионного неразъемного соединения на образцах "штулка—вал" из сплава ОТ4-1.

Методика проведения исследований. Образцы из титанового сплава ОТ4-1 изготовлены по методике, приведенной в работе [15]. При этом максимальный натяг образцов "штулка—вал" составлял 450 мкм, а площадь физического контакта — чуть больше 60 % от общей площади сопряженной поверхности.

Химический состав определяли на опико-эмиссионном анализаторе Q4 Matrix Analysis Results.

Микротвердость измеряли на микротвердомере Shimadzu HNV при нагрузке на индентор 0,9807 Н.

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Nikon Ma200 и растровом электронном микроскопе Hitachi S 3400-N.

Плотность дислокаций определяли по методике, приведенной в работе [11].

Испытания на выпрессовку, имитирующие испытания на срез цельных образцов по ГОСТ Р 50076—92 [12], проводили на испытательном комплексе Instron 3382.

Анализ распределения легирующих компонентов выполняли на растровом электронном микроскопе Hitachi S 3400-N в режиме точечного измерения химического состава в 12 точках на 4 участках шлифа.

Дополнительно осуществляли микрорентгеноструктурный анализ на металлографическом исследовательском комплексе на базе EЭ-SEM Hitachi-SU-70 (Япония) с приставками энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа (Thermo SirhtifiTC Ultra Dray). Анализ проводили на 2—3 участках шлифа, рассчитывали среднее содержание элементов в структурных составляющих сплава ОТ4-1.

Результаты исследований и их обсуждение.

Основными легирующими элементами в сплаве ОТ4-1 являются алюминий (1,5...2,5 Al % мас.) и марганец (0,8...2,0 Mn % мас.) по ГОСТ 19807—91. Псевдо- α -сплав имеет преимущественно α -структуру и небольшое количество β -фазы (1...5 %) [22] вследствие дополнительного легирования β -стабилизаторами (Mn, V, Nb, Mo и др.). Сохраняя преимущества α -сплава, они благодаря наличию β -фазы обладают высокой технологической пластичностью.

При одновременном присутствии Al и Mn в сплаве ОТ4-1 образуются твердые растворы на основе титана (α_{Al} и α_{Mn}) и химические соединения Ti_3Al и $TiMn$ (рис. 1)

Выполнив первое условие получения физического контакта при тугой посадке образцов "втулка—вал" из сплава ОТ4-1 [18, 19], необходимо было завершить процесс получения диффузионного соединения.

Исходя из теории рекристаллизационных процессов пластически-деформированных металлов [20] и фазовых превращений [21], выбрали температуру фазового предпревращения для завершения образования неразъемного соединения.

Температуры завершения заключительных стадий образования диффузионного неразъемного соединения (925, 950, 975 и 1000 °С) полученного физического контакта сплава ОТ4-1 при натяге 450 мкм выбраны на основе анализа дилатограммы, где наблюдалось аномальное увеличение пластичности в области предпревращения $\alpha \rightarrow \beta$ -фаз при температурах 930...940 °С вследствие ослабления межатомных связей $TiAl$, $TiMn$, $Al-Mn$ и других с учетом влияния на температуру фазового предпревращения скорости нагрева.

Как видно из данных рис. 2, кинетика изменения структуры в зоне напряженно-деформированного физического контакта с натягом 450 мкм сплава ОТ4-1 в образцах "втулка—вал" полностью соответствует закономерностям рекристаллизационных процессов. При температурах 925...950 °С с выдержкой 60 мин, 975 °С с выдержкой 20 мин и 1000 °С с выдержкой 10 мин происходит перераспределение дислокаций, которые в области плоскости скопления собираются в ячеистую структуру с образованием правильных границ. Происходит трансформация вытянутых текстурованных деформацией зерен в беспорядочно ориентированные мелкие зерна округлой формы, т.е. образование

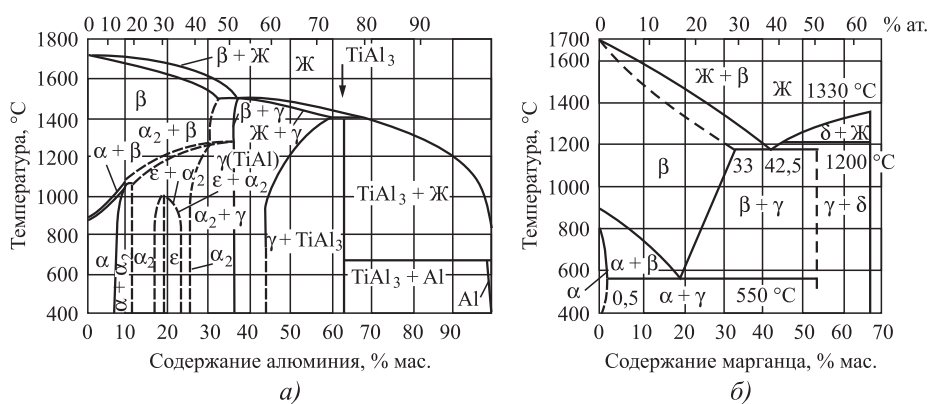


Рис. 1. Диаграммы состояния двухкомпонентных систем $Ti-Al$ (а) и $Ti-Mn$ (б)

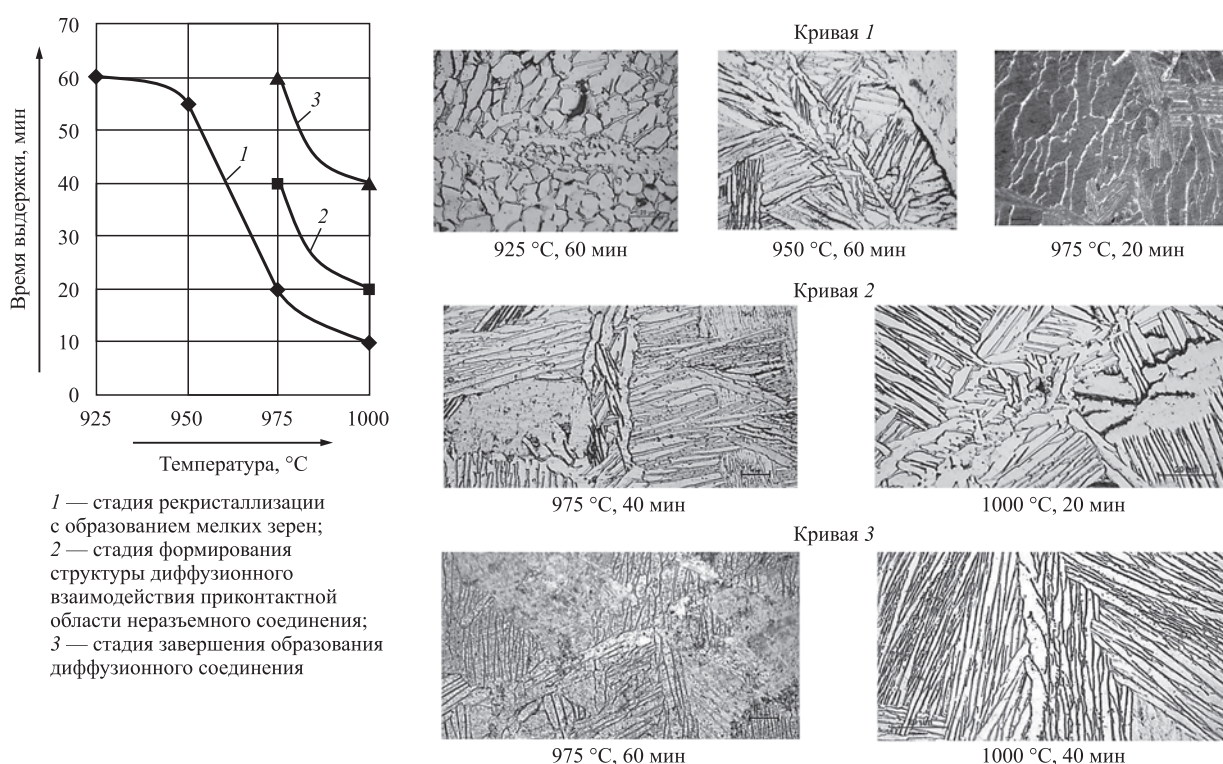


Рис. 2. Кинетические кривые влияния температуры на изменение структуры в зоне напряженно-деформированного диффузионного контакта сплава ОТ4-1 в образцах "втулка—вал"

новых равновесных мелких зерен с кристаллической структурой (кривая 1 на рис. 2).

Резкий скачок по времени при переходе к температурам 975 и 1000 °С свидетельствует о высокой скорости протекания диффузионных процессов, т.е. о предпревращении в данных температурных условиях пластически деформированного сплава ОТ4-1. Дальнейшее увеличение времени выдержки для этих температур (975 и 1000 °С) приводит от стадии полигонизации к стадии собирательной рекристаллизации по миграционному механизму — диффузионному процессу (кривые 2, 3 на рис. 2). При этом при температурно-временных условиях (кривая 3 на рис. 2) процесс диффузионного взаимодействия завершается и структура становится идентичной структуре основного материала.

Известно [20—22], что пластическая деформация металлов вызывает увеличение количества нарушений кристаллического строения и делает его термодинамически неустойчивым. При низких температурах состояние наклепа (напряженно-деформированного состояния) устойчиво и может сохраняться неограниченно долго, так как диффузионная подвижность атомов мала.

Этому напряженно-деформированному состоянию соответствует приконтактная область неразъемного физического контакта сплава ОТ4-1 на образце "втулка—вал" в процессе тугой посадки с натягом 450 мкм [19].

При этом микротвердость после тугой посадки с натягом 450 мкм в зоне физического контакта образцов из сплава ОТ4-1 достигает значений $HV = 620...688$ МПа, что превышает микротвердость основного металла более чем в 2 раза (рис. 3).

При повышении температуры увеличивается диффузионная подвижность атомов и начинают протекать процессы разупрочнения, в результате которого металл переходит в более равновесное состояние.

Изменение микротвердости в зоне физического контакта образцов из сплава ОТ4-1 в температурно-временных условиях фазового предпревращения полностью соответствует рекристаллизационным закономерностям структурных изменений (см. рис. 2 и 3).

На первом этапе температурно-временных условий нагрева микротвердость физического контакта изменяется от 370 до 450 МПа (см. рис. 3, температура 950 °С, 60 мин и 975 °С, 20 мин).

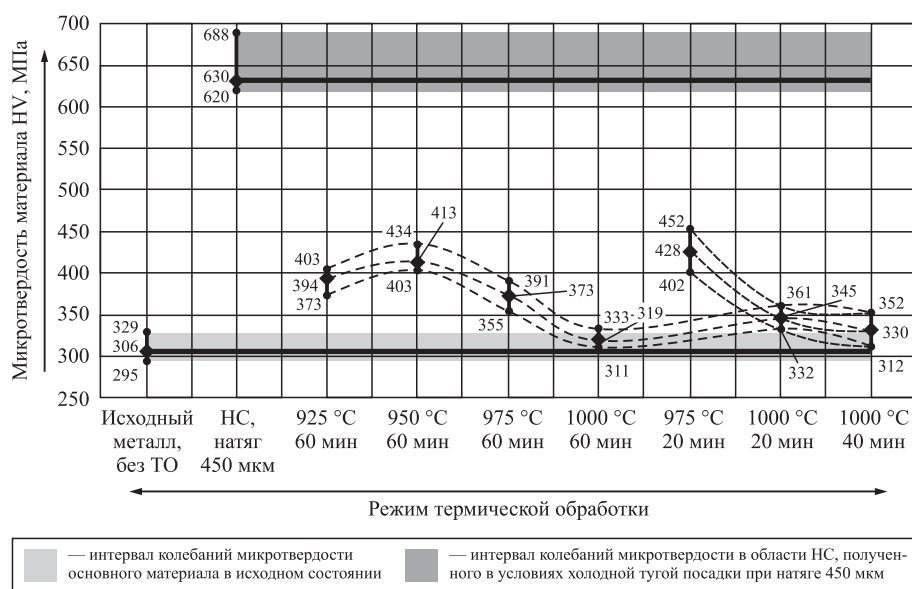


Рис. 3. Температурная зависимость изменения микротвердости диффузионного соединения неразъемного соединения сплава ОТ4-1 в сравнении с микротвердостью основного металла и физического контакта после тугой посадки с натягом 450 мкм и предельным допуском микротвердости к основному металлу

Наблюдается резкий скачок изменения микротвердости физического контакта образцов титанового сплава ОТ4-1 при температурах от 975 к 1000 °С, который свидетельствует о высокой скорости протекания диффузионных процессов в температурно-временных условиях фазового превращения (см. рис. 3). При этом микротвердость физического контакта образцов сплава ОТ4-1 несколько превышает микротвердость основного материала, что свидетельствует о повышенной устойчивости структуры и микротвердости (прочности) в сравнении с отожженным состоянием и полностью согласуется с результатами исследований в работе [20].

Распределение основных легирующих элементов Al и Mn в приконтактной области неразъемного соединения в образцах и сплава ОТ4-1 после тугой посадки с натягом 450 мкм и последующим нагревом в интервале температуры фазового превращения приведено в табл. 1–4.

В табл. 1 химический состав основного металла исследуемых образцов из сплава ОТ4-1 приведен в процентах по массе. Распределение основных легирующих элементов Al и Mn исследовали весовым и атомным микроанализом. При этом содержание легирующих элементов (особенно Al) значительно отличалось от допусков по ГОСТу и от основного металла, что объяснимо,

1. Химический состав основного металла образцов "втулка—вал" из сплава ОТ4-1

Номер измерения	Содержание элементов, % мас.		
	Ti	Al	Mn
1	95,83	1,97	0,97
2	97,16	2,02	1,2
3	96,17	1,95	1,78
4	94,96	2,11	1,53
5	95,53	2,36	1,77
Среднее значение	95,93	2,08	1,45
Значение по ГОСТ 19807–91	Основа	1,5...2,5	0,8...2,0

поскольку содержание элементов определено в структурных составляющих.

Оценка характера распределения основных легирующих элементов двумя методами показала их идентичность: четко прослеживается стадийность изменения распределения этих элементов (см. табл. 2–4).

Поэтому характер распределения основных легирующих элементов в зависимости от условий тугой посадки с натягом 450 мкм образца "втулка—вал" и последующей стадии образования диффузионного соединения при нагреве в температурно-временных условиях фазового

2. Сравнительная оценка характера распределения легирующих элементов Al и Mn в образцах "втулка—вал" из сплава ОТ4-1 после тугой посадки с натягом 450 мкм весовым и атомным микрорентгеноспектральными методами

Удаление от линии физического контакта, мкм		Содержание элементов					
		Al		Mn		Ti	
		% мас.	% ат.	% мас.	% ат.	% мас.	% ат.
0	Втулка	$\frac{1,52...2,04^*}{1,69}$	$\frac{2,68...3,57}{3,1}$	$\frac{0,38...1,69}{1,2}$	$\frac{0,33...1,46}{1,04}$	$\frac{96,72...97,58}{97,15}$	$\frac{95,61...96,10}{95,86}$
	Вал	$\frac{1,9...2,05}{2,0}$	$\frac{3,33...3,59}{3,35}$	$\frac{0,49...1,21}{0,75}$	$\frac{0,42...1,04}{0,60}$	$\frac{96,88...97,46}{97,17}$	$\frac{95,22...95,99}{95,61}$
25	Втулка	$\frac{1,87...2,01}{1,95}$	$\frac{3,28...3,52}{3,42}$	$\frac{0,8...1,26}{0,97}$	$\frac{0,69...1,09}{0,83}$	$\frac{96,76...97,28}{97,02}$	$\frac{95,45...95,99}{95,72}$
	Вал	$\frac{1,84...2,08}{1,98}$	$\frac{3,23...3,64}{3,47}$	$\frac{1,15...2,15}{1,53}$	$\frac{0,99...1,85}{1,32}$	$\frac{96,01...96,82}{95,42}$	$\frac{94,92...95,46}{95,19}$
50	Втулка	$\frac{1,70...2,0}{1,84}$	$\frac{2,98...3,50}{3,28}$	$\frac{0,97...1,53}{1,76}$	$\frac{0,83...1,32}{1,03}$	$\frac{96,78...97,22}{97}$	$\frac{95,54...95,98}{95,76}$
	Вал	$\frac{1,88...1,96}{1,91}$	$\frac{3,29...3,44}{3,35}$	$\frac{0,09...0,17}{0,40}$	$\frac{1,25...1,29}{1,26}$	$\frac{96,54...96,68}{96,61}$	$\frac{95,27...95,46}{95,37}$
75	Втулка	$\frac{1,75...2,05}{1,87}$	$\frac{3,07...3,59}{3,33}$	$\frac{0,40...1,75}{0,86}$	$\frac{0,35...1,51}{0,74}$	$\frac{96,42...97,84}{97,13}$	$\frac{95,28...96,58}{95,93}$
	Вал	$\frac{1,79...2,16}{1,95}$	$\frac{3,13...3,77}{3,42}$	$\frac{0,83...1,47}{1,25}$	$\frac{0,71...1,27}{1,01}$	$\frac{96,61...97,01}{96,81}$	$\frac{95,38...95,61}{95,5}$
100	Втулка	$\frac{1,90...2,10}{1,98}$	$\frac{3,32...3,68}{1,47}$	$\frac{0,76...0,84}{0,8}$	$\frac{0,65...0,72}{0,69}$	$\frac{97,14...97,28}{97,21}$	$\frac{95,67...95,97}{95,82}$
	Вал	$\frac{1,92...2,11}{2,01}$	$\frac{3,37...3,69}{3,53}$	$\frac{0,74...0,94}{0,81}$	$\frac{0,64...0,81}{0,70}$	$\frac{96,95...97,33}{97,14}$	$\frac{95,50...95,99}{95,75}$
125	Втулка	$\frac{1,99...2,19}{2,07}$	$\frac{3,48...3,83}{3,63}$	$\frac{0,48...1,39}{0,95}$	$\frac{0,41...1,20}{0,82}$	$\frac{96,57...97,53}{97,05}$	$\frac{95,23...96,11}{95,67}$
	Вал	$\frac{1,76...2,10}{1,9}$	$\frac{3,09...3,68}{3,34}$	$\frac{1,21...1,63}{1,38}$	$\frac{1,04...1,41}{1,20}$	$\frac{96,61...96,83}{96,72}$	$\frac{95,28...95,61}{95,45}$
150	Втулка	$\frac{1,55...1,92}{1,77}$	$\frac{2,73...3,36}{3,12}$	$\frac{0,57...1,67}{1,2}$	$\frac{0,49...1,45}{1,09}$	$\frac{96,77...97,52}{97,15}$	$\frac{95,56...96,16}{95,86}$
	Вал	$\frac{1,65...2,07}{1,91}$	$\frac{2,89...3,61}{3,33}$	$\frac{1,40...1,62}{1,48}$	$\frac{1,21...1,40}{1,28}$	$\frac{96,53...96,73}{96,63}$	$\frac{95,18...95,70}{95,44}$

* В числителе приведены минимальное и максимальное значения, а в знаменателе — среднее значение.

предпревращения определен весовым методом и приведен на рис. 4.

Диффузионные процессы при пластической деформации — тугая посадка образцов "втулка—вал" с натягом 450 мкм в напряженно-деформированном физическом контакте и в диффузионном соединении после нагрева в интервале температур фазового предпревращения в первом случае приводят к увеличению

микротвердости более чем на 200 % в сравнении с микротвердостью основного металла, а во втором случае — к снижению искажений кристаллической решетки и полигонизации, к уменьшению микротвердости, близкой к микротвердости основного металла. Об этом свидетельствуют процессы стадийного распределения основных легирующих элементов Al и Mn в приконтактной области физического

3. Распределение легирующих элементов в приконтактной области НС, полученного в условиях холодной тугой посадки заготовок "втулка—вал" из сплава ОТ4-1 при натяге 450 мкм

Удаление от линии физического контакта, мкм	Распределение легирующих элементов, % мас.			
	Mn		Al	
	Втулка	Вал	Втулка	Вал
0 (линия физического контакта)	1,36...2,01 1,68		1,59...2,93 2,2	
±20	$\frac{1,28...2,05}{1,76}$	$\frac{1,1...1,78}{1,49}$	$\frac{1,79...2,43}{2,19}$	$\frac{1,09...2,78}{2,03}$
±40	$\frac{1,11...1,66}{1,46}$	$\frac{0,99...1,96}{1,48}$	$\frac{1,48...2,45}{2,09}$	$\frac{1,47...2,41}{2,06}$
±60	$\frac{1,0...1,96}{1,64}$	$\frac{0,48...1,77}{1,42}$	$\frac{1,78...2,35}{2,5}$	$\frac{1,47...2,52}{1,91}$
±100	$\frac{0,99...2,2}{1,45}$	$\frac{1,0...2,2}{1,65}$	$\frac{1,47...2,29}{1,95}$	$\frac{1,42...2,52}{1,99}$
±200	$\frac{0,99...2,01}{1,55}$	$\frac{1,11...1,96}{1,42}$	$\frac{1,59...2,47}{2,1}$	$\frac{1,69...2,47}{2,19}$
±300	$\frac{1,25...1,78}{1,56}$	$\frac{1,44...2,04}{1,74}$	$\frac{1,06...2,44}{1,96}$	$\frac{1,47...2,75}{1,86}$
±400	$\frac{1,19...2,0}{1,64}$	$\frac{0,81...1,69}{1,53}$	$\frac{1,31...2,37}{2,02}$	$\frac{1,49...2,55}{1,98}$
±600	$\frac{1,08...1,96}{1,44}$	$\frac{0,99...2,01}{1,56}$	$\frac{1,23...2,41}{1,95}$	$\frac{1,63...2,39}{1,98}$
±800	$\frac{1,0...2,05}{1,6}$	$\frac{1,09...1,93}{1,57}$	$\frac{1,55...2,41}{2,12}$	$\frac{1,47...2,24}{1,87}$
±1000	$\frac{1,0...2,01}{1,6}$	$\frac{1,08...2,05}{1,67}$	$\frac{1,59...2,41}{1,99}$	$\frac{1,0...2,08}{1,65}$

контакта (см. табл. 2—4) и диффузионного соединения (см. рис. 4).

Известно [14, 15], что высокие значения степени пластической деформации обуславливают значительное упрочнение приконтактной области НС, при этом ускоряются диффузионные процессы, генерация и движение в зону контакта дефектов кристаллической структуры образца "втулка—вал" (дислокации и вакансии). Наблюдается четко стадийность процесса распределения легирующих элементов Al и Mn. Чем дальше от линии физического контакта, тем менее выражена стадийность изменения распределения легирующих элементов Al и Mn в α -твердом растворе (см. табл. 2—4).

Такая закономерность свидетельствует о затухании степени упругопластической деформации в приконтактной области и ее влиянии

на процессы взаимодействия поля искажений кристаллической решетки и изменения распределения легирующих элементов.

Процессы полигонизации и полной рекристаллизации при нагреве в температурно-временном интервале фазового превращения приводят к существенным изменениям в распределении легирующих элементов в приконтактной области образованного диффузионного соединения образцов "втулка—вал" из сплава ОТ4-1 (см. рис. 4), причем изменения как и при деформации носят дискретный стадийный характер и по разбросу значений в каждой зоне и по средним значениям.

Уменьшение содержания Al и увеличение содержания Mn в α -твердом растворе приводит к снижению микротвердости и постепенному уменьшению по мере удаления от линии со-

4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа приконтактной области НС, полученного в условиях холодной тугой посадки заготовок "втулка—вал" из сплава ОТ4-1 при натяге 450 мкм

Удаление от линии физического контакта, мкм	Номер измерения	Содержание элементов, % ат.					
		Al		Mn		Ti	
		Втулка	Вал	Втулка	Вал	Втулка	Вал
0 (линия физического контакта)	1	2,68 ± 0,11	3,58 ± 0,13	1,46 ± 0,08	0,42 ± 0,07	95,86 ± 0,37	95,99 ± 0,37
	2	3,06 ± 0,12	3,59 ± 0,13	1,33 ± 0,08	0,60 ± 0,07	95,61 ± 0,37	95,81 ± 0,37
	3	3,57 ± 0,13	3,33 ± 0,12	0,33 ± 0,07	1,04 ± 0,14	96,10 ± 0,38	95,62 ± 0,37
±25	1	3,46 ± 0,12	3,23 ± 0,13	1,09 ± 0,08	1,85 ± 0,08	95,45 ± 0,37	94,92 ± 0,37
	2	3,28 ± 0,12	3,55 ± 0,13	0,73 ± 0,07	0,99 ± 0,08	95,99 ± 0,37	95,46 ± 0,37
	3	3,52 ± 0,13	3,64 ± 0,13	0,69 ± 0,07	1,12 ± 0,08	95,79 ± 0,37	95,25 ± 0,37
±50	1	2,98 ± 0,12	3,29 ± 0,08	1,32 ± 0,15	1,25 ± 0,15	95,71 ± 0,37	95,46 ± 0,37
	2	3,50 ± 0,13	3,33 ± 0,12	0,96 ± 0,08	1,25 ± 0,08	95,54 ± 0,37	95,42 ± 0,37
	3	3,19 ± 0,12	3,44 ± 0,08	0,83 ± 0,08	1,29 ± 0,14	95,98 ± 0,37	95,27 ± 0,37
±75	1	3,21 ± 0,13	3,35 ± 0,07	1,51 ± 0,15	1,27 ± 0,15	95,28 ± 0,37	95,38 ± 0,37
	2	3,07 ± 0,12	3,13 ± 0,13	0,35 ± 0,07	1,26 ± 0,08	96,58 ± 0,37	95,61 ± 0,37
	3	3,59 ± 0,13	3,77 ± 0,13	0,37 ± 0,07	0,71 ± 0,07	96,04 ± 0,37	95,51 ± 0,37
±100	1	3,41 ± 0,12	3,54 ± 0,13	0,72 ± 0,07	0,66 ± 0,07	95,87 ± 0,37	95,80 ± 0,37
	2	3,32 ± 0,12	3,37 ± 0,13	0,71 ± 0,14	0,64 ± 0,07	95,97 ± 0,37	95,99 ± 0,37
	3	3,68 ± 0,12	3,69 ± 0,13	0,65 ± 0,07	0,81 ± 0,07	95,67 ± 0,37	95,50 ± 0,37
±125	1	3,83 ± 0,08	3,09 ± 0,12	0,85 ± 0,08	1,41 ± 0,15	95,32 ± 0,37	95,50 ± 0,37
	2	3,48 ± 0,12	3,26 ± 0,12	0,41 ± 0,07	1,13 ± 0,14	96,11 ± 0,37	95,61 ± 0,37
	3	3,58 ± 0,08	3,68 ± 0,13	1,20 ± 0,08	1,04 ± 0,08	95,23 ± 0,37	95,28 ± 0,37
±150	1	2,73 ± 0,12	3,61 ± 0,13	1,45 ± 0,15	1,21 ± 0,15	95,83 ± 0,37	95,18 ± 0,37
	2	3,26 ± 0,13	3,50 ± 0,13	1,18 ± 0,08	1,22 ± 0,14	95,56 ± 0,37	95,28 ± 0,37
	3	3,36 ± 0,13	2,89 ± 0,12	0,49 ± 0,07	1,40 ± 0,08	96,16 ± 0,37	95,70 ± 0,37

пряжения в образце "втулка—вал". Таким образом, снижение микротвердости до уровня, близкого к микротвердости основного металла в зоне сопряжения — заключительный этап формирования диффузионного соединения (см. рис. 4).

Из данных рис. 4 следует, что максимальная скорость диффузионных процессов распределения основных легирующих элементов Al и Mn соответствует температурному интервалу 975...1000 °С для структурных изменений и для изменения значений микротвердости.

По данным работы [20], полигонизованная структура характеризуется повышенной устойчивостью и повышенной прочностью в сравнении с отожженным состоянием. При этом

практически полностью снимается наклеп — плотность дислокаций снижается на 4 порядка.

Проведенные по результатам дюротрии расчеты по методике, приведенной в работе [18], для зоны сопряжения образцов "втулка—вал" из сплава ОТ4-1, показали снижение плотности дислокаций более чем на 2 порядка после нагрева в автовакууме при 1000 °С, 60 мин в сравнении с тугой посадкой с натягом 450 мкм. Плотность дислокаций на линии сопряжения после тугой посадки для числового коэффициента $k = 3$ и 5 составляла $100 \cdot 10^{10}$ и $280 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответственно, а после нагрева по указанному режиму — $49 \cdot 10^{10}$ и $158 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Исследования прочности на выпрессовку диффузионных соединений образцов "втулка—

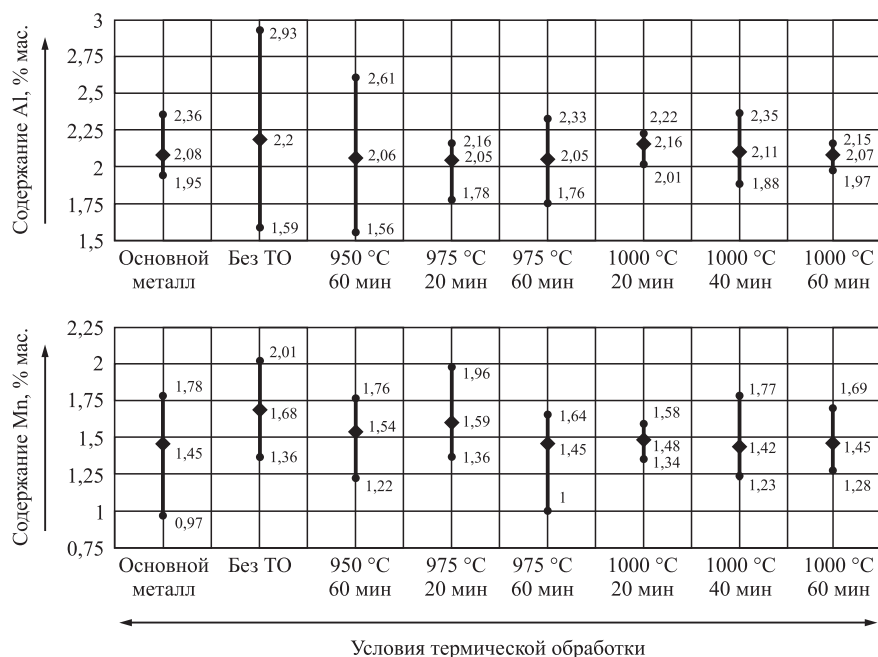


Рис. 4. Температурно-временная зависимость распределения основных легирующих элементов Al и Mn в зоне сопряжения заготовок из сплава ОТ4-1 после их холодной тугой посадки и термической обработки в интервале температур фазового перехода с различным временем выдержки

5. Влияние нагрева в интервале температур фазового превращения заготовок "втулка—вал" из сплава ОТ4-1 на прочность при испытании на выпрессовку—срез

Выдержка, мин	Прочность при выпрессовке—срезе, МПа, при температуре, °C			
	925	950	975	1000
60	$\frac{816...873}{840,2}$	$\frac{883...951}{916}$	$\frac{924...1006}{964,8}$	$\frac{973...1114}{1040,8}$
40	—	—	—	$\frac{958...1053}{996,2}$
20	—	—	$\frac{912...991}{950,2}$	$\frac{903...968}{933,4}$

Примечание. Без термической обработки основного металла прочность при выпрессовке—срезе не менее 960 МПа.

вал" из сплава ОТ4-1 показали удовлетворительную сходимость с прочностью испытаний на срез основного металла (табл. 5).

Заключение. Установлены закономерности влияния нагрева в интервале температур фазового предпревращения на изменения структуры, микротвердости и распределение основных легирующих элементов Al и Mn в приконтактной области неразъемного соединения физического контакта сплава ОТ4-1 образца "втулка—вал" после тугой посадки с натягом 450 мкм.

Выявлен температурно-временной интервал фазового предпревращения ускоренных диффу-

зионных процессов образования диффузионного неразъемного соединения сплава ОТ4-1, соответствующий нагреву в автовакууме при температуре 975...1000 °C с выдержкой от 20 до 60 мин. При этом структура в приконтактной области претерпевает трансформацию из вытянутых текстурованных деформацией зерен в ячеистую мелкозернистую округлой формы, с увеличением выдержки процесс трансформации завершается и структура становится идентичной структуре основного металла. Наблюдаются вторая и третья стадии образования диффузионного неразъемного соединения

из полученного тугой посадкой образца "втулка—вал" физического контакта сплава ОТ4-1.

Изменение микротвердости и распределение основных легирующих элементов Al и Mn в приконтактной области неразъемного соединения сплава ОТ4-1 повторяют закономерности структурных изменений при нагреве в интервале температур фазового предпревращения, полностью исчезает наклеп, уменьшается плотность дислокаций и свойства неразъемного соединения соответствуют свойствам основного металла при испытании на выпрессовку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Муравьев В.И., Братухин А.Г., Долотов Б.И.** Эффективность применения титана и его сплавов в авиастроении // *Авиационная промышленность*. 1997. № 3—4. С. 3—9.
2. **Братухин А.Г.** Технологическое обеспечение высокого качества, надежности, ресурса авиационной техники. В 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.
3. **Металлургия** и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блащук и др. Киев: Наук. думка, 1986. 240 с.
4. **Исследование** прочности диффузионных сварных соединений сталь—титан / М.Е. Родин, А.Н. Семенов, М.И. Плышевский и др. // *Сварочное производство*. 2012. № 4. С. 14—19.
5. **Структура** сварного соединения титановый сплав—аустенитная сталь, полученного сваркой давлением с промежуточными покрытиями / Н.В. Бойко, И.А. Хазов, Л.В. Селезнева и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 9. С. 51—55.
6. **Structure** and properties of solid state diffusion bonding of 17-4PH stainless steel and titanium / S. Kundu, S. Chatterjee, S.M. Bhola, B. Mishra // *Materials Science and Technology*. 2014. No. 30. P. 248—256.
7. **Диффузионная** сварка титановых заготовок через прослойку с высоким сопротивлением деформации / А.Б. Булков, В.В. Пешков, Д.Н. Балбекови др. // *Сварочное производство*. 2013. № 11. С. 12—16.
8. **Диффузионная** сварка через промежуточные слои / Г.М. Зеер, Е.Г. Зеленкова, Ю.П. Королева и др. // *Сварочное производство*. 2012. № 7. С. 38—43.
9. **Microstructure** and mechanical properties of diffusion bonded titanium/304 stainless steel joint with pure Ag interlayer / Y. Deng, G. Sheng, Z. Huang, L. Fan // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013. No. 18. P. 143—146.
10. **Sheng G., Yuan X., Tang K.** Effect of interlayer type on microstructure and mechanical property of impulse pressuring diffusion bonded joints in austenitic stainless steel to a titanium alloy // *Materials Research Innovations*. 2013. No. 17. P. 186—189.
11. **Влияние** микрогеометрии поверхности на кинетику развития контакта при диффузионной сварке титана / А.Б. Булков, С.В. Сафонов, Д.Н. Балбеков, В.Р. Петренко, В.В. Пешков // *Сварочное производство*. 2013. № 1. С. 22—27.
12. **Влияние** технологических параметров на процесс диффузионной сварки титана / А.К. Булков, В.В. Пешков, В.Р. Петренко, Д.Н. Балбеков, А.И. Стрыгин // *Сварочное производство*. 2013. № 3. С. 53—60.
13. **Кинетика** развития физического контакта при диффузионной сварке титана / А.Б. Булков, Д.Н. Балбеков, В.В. Пешков, А.И. Стрыгин // *Сварочное производство*. 2013. № 10. С. 41—49.
14. **Effect** of Heating on the Structure and Properties of a Solid-Phase Diffusion Bond Based on a Forced Fit in OT4-1 Alloy / P.V. Bakhmatov, V.I. Murav'ev, A.V. Frolov, V.S. Pitsyk // *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48, No. 12. P. 773—782.
15. **Пицык В.С., Муравьев В.И., Бахматов П.В.** Изменение зеренной структуры и микротвердости приконтактных областей диффузионного соединения титановых сплавов // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2018. № 2—1 (34). С. 91—104.
16. **Муравьев В.И., Пицык В.С.** Применение диффузионной сварки при изготовлении титановых элементов авиационного назначения // *Авиационная промышленность*. 2015. № 4. С. 25—32.
17. **Муравьев В.И., Пицык В.С.** Исследование процессов объемного взаимодействия заготовок типа отверстие—вал в автовакууме при температуре предпревращения // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2014. № 3—1. С. 96—104.
18. **Репникова Е.А.** Физическое материаловедение. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 86 с.
19. **Пицык В.С., Дмитриев Э.А., Муравьев В.И.** Исследование структуры и свойств физического контакта неразъемного соединения, созданного холодной тугой посадкой вала во втулку из сплава ОТ4-1 // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета*. 2021. № 1. С. 69—75.
20. **Новиков И.И.** Дефекты кристаллического строения металлов. М.: Metallurgy, 1983. 208 с.
21. **Гуляев А.П.** Состояние предпревращения в сплавах железа // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991. № 6. С. 7—10.
22. **Колачев Б.А., Елагин В.И., Пиванов В.А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2005. 432 с.

Виктор Сергеевич Пицык;

Эдуард Анатольевич Дмитриев, д-р техн. наук;

Василий Илларионович Муравьев, д-р техн. наук;

Егор Андреевич Старцев,

egorstarts@inbox.ru

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2021 г.

Литейное и сварочное производства

Александров Н.Н., Гущин Н.С., Нуралиев Н.Ф. Особенности изготовления мелющих элементов для углеразомольных мельниц из высокотехнологичного износостойкого хромоникелевого чугуна . . . № 2

Акутин А.А., Изотов В.А., Шатульский А.А. Литниковая система с центрифугирующим элементом . . . № 1

Березина В.А., Овчинников В.В., Лукьяненко Е.В. Особенности сварки трением с перемешиванием стыковых соединений литейного сплава ВАЛ8 с деформируемыми сплавами 1565чН2 и АМг6М . . . № 10

Богданов Р.А. Влияние модифицирования на ударную вязкость ответственных вагонных отливок из стали 20ГЛ № 7

Васильев П.А., Христофоров О.В., Данилов П.Г., Калинин А.Г., Осанов В.Н., Васильев И.П., Григорьев В.С. Машина фрикционной сварки "Малахит" № 12

Дегтярев А.Ф., Скоробогатых В.Н., Назаратин В.В., Нуралиев Ф.А., Кафтанников А.С. Повышение хладостойкости отливок из сталей типа 20ГЛ № 5

Зарубина О.А., Зарубин А.М. Критерий загрязненности силуминовых отливок оксидами при литье в кокиль № 3

Зарубина О.А., Зарубин А.М. Упруговязкопластическая модель расплава АК9 и опыт ее применения в программе FLOW 3D № 6

Иванина Е.С., Монастырский В.П. Применение критерия Ниямы для прогнозирования усадочной пористости № 12

Илларионов И.Е., Жирков Е.Н., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Разработка торфосодержащих смесей для теплоизоляции прибылей отливок с использованием аминокорбонатных комплексов. № 11

Лебедев В.А. Состояние и направления развития систем и способов управления переносом электродного металла, формированием шва и валика

при электродуговой механизированной и автоматической сварке—наплавке. № 3

Лебедев В.А. Специальные способы и устройства оценки работы систем механизированного оборудования для электродуговой сварки и наплавки № 5

Лебедев В.А., Кражановский Д.Н. Изучение формы шва и наплавленного в нижнем положении валика при полуавтоматической подводной сварке мокрым способом № 11

Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Кошелев О.С., Марков А.И. Неорганические соли и их сочетания как связующие стержневых смесей № 4

Мальнев А.Д., Глуховской С.В., Михеев Р.С. Применение процесса фрикционной наплавки для изготовления сталеалюминиевых функционально-градиентных слоистых композиций. № 2

Муратов В.С., Казаков М.С. Технологичность сплавов системы Al—Mg—Si при изготовлении тонкостенных трубчатых изделий с использованием сварки и обжатия № 8

Овчинников В.В., Дриц А.М., Соловьева И.В. Влияние параметров режима сварки трением с перемешиванием на свойства и структуру соединений листов сплава 1151Т. № 1

Овчинников В.В., Растопчин Р.Н., Андреева Л.П. Влияние легирования скандием присадочной проволоки на свойства сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов. № 6

Семеновичков М.В., Семеновичков В.С. Влияние геометрических параметров деталей на напряженно-деформированное состояние в зонах контакта при их сварке № 9

Стрельников И.А., Пестряева Л.Ш., Садетдинов Ш.В. Модифицирование лигносульфонатов метаборатами лития, натрия и калия № 8

Стулов В.В., Шафиев О.М. Исследование получения в охлаждаемом стальном кокиле полый цилиндрической отливки из алюминиевого сплава для прокатки трубной заготовки № 10

Филиппов О.И., Ерофеев В.А., Шолохов М.А., Полосков С.И. Исследование особенностей формирования корня шва при двухсторонней синхронизированной дуговой сварке вертикальных стыков стальных резервуаров № 4

Филяков А.Е. Влияние обрывов и коротких замыканий на образование несплавлений у боковой стороны разделки при многопроходной сварке трубопроводов с поперечными колебаниями № 8

Филяков А.Е., Ерофеев В.А., Шолохов М.А., Мельников А.Ю. Влияние обрывов дуги на образование межслойных несплавлений при сварке трубопроводов плавящимся электродом № 7

Харчев Р.М., Грачев А.Н. Технологическая проба для оценки заполняемости тонкостенных корпусных отливок из алюминиевых сплавов № 9

Кузнечно-штамповочное производство

Вайцехович С.М., Власов Ю.В., Журавлёв А.Ю. Совершенствование технологии немонотонного деформирования в обработке металлов давлением № 3

Власов А.В., Кривенко Д.В., Стебунов С.А., Биба Н.В., Дюжев А.М. Проектирование предварительных переходов при осевой горячей объемной штамповке методом изотермических поверхностей. Часть 1. Обзор методов проектирования предварительных переходов. Теоретические аспекты метода изотермических поверхностей и методика расчета геометрии предварительного перехода № 5

Власов А.В., Кривенко Д.В., Стебунов С.А., Биба Н.В., Дюжев А.М. Проектирование предварительных переходов при осевой горячей объемной штамповке методом изотермических поверхностей. Часть 2. Особенности применения метода изотермических поверхностей для сложных поковок № 6

Власов А.В., Кривенко Д.В., Стебунов С.А., Биба Н.В., Дюжев А.М. Проектирование предварительных переходов при осевой горячей объемной штамповке методом изотермических поверхностей. Часть 3. Примеры проектирования предварительных переходов № 7

Галкин В.В., Манцеров С.А., Дудников Д.О., Огурцов Н.А. Применение программного обеспечения для определения механических свойств металлических материалов в условиях многопереходного деформирования № 9

Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Повышение рациональности применения холодного выдавливания при производстве деталей типа стальных глубоких стаканов № 6

Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Производство стаканов с фланцем в донной части холодным выдавливанием на специализированном прессе № 10

Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С. Повышение производительности холодного выдавливания глубоких втулок при использовании специализированных прессов № 8

Золотов А.М., Смирнов М.О. Разработка методики определения КПД удара штамповочного молота № 11

Кайбаров А.П., Евсюков С.А. Исследование процесса обжима трубной заготовки с получением постоянной толщины стенки № 8

Кокорин В.Н., Табаков В.П., Морозов О.И., Титов Ю.А., Мишов Н.В., Шиллер Н.П., Корчакин А.С. Исследование и анализ напряженно-деформированного состояния разделительных операций листовой штамповки № 11

Лавриненко В.Ю. Разработка процессов осадки и протяжки на молотах при деформировании бабой молота с наполнителем № 1

Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Файрузов Р.С., Айрапетян А.С., Кирсанов А.С. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок из легированных сталей на сопротивление деформированию при холодной объемной штамповке. № 9

Ларин С.Н., Платонов В.И., Романов П.В. Экспериментальное исследование силовых режимов совмещенного процесса обжима с утонением № 12

Мартюгин А.В., Володин И.М. Применение нейросетей для совершенствования технологии штамповки поковок коленчатых валов для обеспечения их балансируемости № 12

Мороз Б.С., Дудник М.Г. Влияние сил трения активного действия на технологические параметры обратного выдавливания № 1

Панфилов Г.В., Нгуен Ван Тинь. Способы изготовления трехслойных уплотнителей с наружными металлическими и центральным эластичным слоями № 2

Пчельников А.В., Филякова В.А., Сидоров А.А. Влияние горячего деформирования на анизотропию механических свойств жаропрочного сплава 901 № 10

- Складчиков Е.Н.** Оптимизация режима работы гидравлического прессы с двухступенчатым насосным приводом № 4
- Смирнов М.О., Золотов А.М., Тюхтяев А.М.** Исследование влияния модуля упругости титановых сплавов на коробление штампованных заготовок при охлаждении. № 5
- Черняев А.В., Чудин В.Н., Гладков В.А.** Изотермическое выдавливание утолщений и фланцев на осесимметричных заготовках № 4
- Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Расчет технологических режимов горячего прямого выдавливания вязкопластичного материала. № 7

Прокатно-волочильное производство

- Арюлин С.Б.** Отечественный опыт разработок станов периодической шаговой прокатки № 5
- Арюлин С.Б., Майдола Э.В.** Зарубежный опыт разработок станов периодической шаговой прокатки. № 8
- Гурьянов Г.Н.** Определение предельных и допустимых значений коэффициента вытяжки и дельта-критерия формы очага деформации при волочении проволоки № 4
- Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Кузьмин В.Г.** Разработка технологии переработки стружковых отходов сплава системы Al—Mg—Sc с применением метода горячего прессования № 3
- Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Юсупов В.С.** Необходимость развития теории листовой прокатки, учитывающей нестационарность технологии и негативные динамические эффекты. № 11
- Колесников А.Г., Алдуин А.В., Сухоставский М.Н.** Оценка минимального обжатия слябов для ликвидации осевой рыхлости № 1
- Корчунов А.Г., Константинов Д.В., Медведева Е.М., Белов В.К., Губарев Е.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния холодной вытянутой шестигранной калиброванной стали № 10
- Котенок В.И., Кузнецов С.А., Берестнев С.А., Тугушев П.Н.** Трехвалковый резьбонакатной стан-автомат СХПРС 20-50 для осевой накатки резьбы заданной длины № 2
- Обзор патентов по прокатно-волочильному производству. № 6**
- Пивоварова К.Г.** Современные методы исследования фазовых превращений в высокоуглеродистой катанке для обеспечения качества высокопрочной арматуры. № 9
- Филатов А.А., Соколова О.В., Лагошина Е.В.** Повышение качества поверхности прецизионных тонкостенных труб № 12

- Шаталов Р.Л., Медведев В.А.** Влияние дисперсности фаз и размера зерна на твердость стальных сосудов на выходе прокатно-прессовой линии № 7

Материаловедение и новые материалы

- Гадалов В.Н., Губанов О.М., Алымов Д.С., Филонович А.В., Ворначева И.В.** Разработка технологии производства и термическая обработка порошкового титанового сплава Ti6,1Al5,4V1,8Sn. № 6
- Гадалов В.Н., Филонович А.В., Ворначева И.В., Филатов Е.А., Макарова И.А.** Некоторые аспекты повышения жаропрочности литейных сложнолегированных сплавов на никелевой основе в результате влияния перераспределения легирующих элементов между γ -твердым раствором и упрочняющей γ' -фазой. № 9
- Дегтярев А.Ф., Скоробогатых В.Н., Муханов Е.Л., Нуралиев Ф.А.** Коррозионно-стойкая сталь 06X15H6МБФ для рабочих колес гидротурбин № 11
- Ерофеев В.А., Страхова Е.А.** Ультразвуковой мониторинг пережога металла № 10
- Золотов А.М., Смирнов М.О., Чижик Т.А.** Исследование механизма износа контактных поверхностей рабочих лопаток паровой турбины из титанового сплава BT6. № 2
- Каблов Е.Н., Дынин Н.В., Бенариев И., Щетинина Н.Д., Самохвалов С.В., Неруш С.В.** Перспективные алюминиевые сплавы для паяных конструкций авиационной техники № 4
- Кондратьев С.Ю., Альхименко А.А., Харьков А.А., Швецов О.В., Давыдов А.Д.** Прогнозирование ресурса трубных сталей при эксплуатации в присутствии сероводорода и углекислого газа № 10
- Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д., Фролов М.А.** Влияние структуры сварного шва на характер разрушения жаропрочного сплава HP40NbTi № 8
- Красуля А.А., Пермитина А.А., Помельникова А.С., Цих С.Г.** Химико-термическая обработка стали 08X18H10T для повышения ее эксплуатационных характеристик № 9
- Курочкина О.С., Серов Р.А., Изотов В.А.** Влияние термической обработки на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов, модифицированных нанокремнеземом № 3
- Латухин Е.И., Умеров Э.Р., Луц А.Р.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез заготовок пористого карбида титана для последующей инфильтрации расплавами № 7

Мирошкин Н.Ю., Гулевский В.А., Цурихин С.Н., Богданов А.И., Гуревич Л.М., Кидалов Н.А. Взаимодействие элементов в системе углерод-графит—расплав Al—Mg—Zn—Cu при совместном действии температуры и давления № 11

Муратов В.С., Якимов Н.С. Отработка вариантов корректирующей термической обработки тяжело-нагруженных изделий из стали 30ХГСН2А № 1

Пицык В.С., Дмитриев Э.А., Муравьев В.И., Старцев Е.А. Влияние температуры фазового превращения на эволюцию структуры физического контакта неразъемного соединения титанового сплава OT4-1 в образцах "втулка—вал" № 12

Путырский С.В., Плохих А.И., Яковлев А.Л. Исследование условий деформации многослойного материала методом конечно-элементного моделирования № 2

Смирнов С.В., Овчинников В.В. Влияние режима локального деформирования с импульсным электронагревом на структуру заготовок из титанового сплава BT6C. № 5

Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М. Влияние технологии горячего изостатического прессования на структуру и свойства изделий из порошка жаропрочного сплава ВЖ159 № 1

Информация

Веремеевич А.Н., Горбатюк С.М., Жариков В.М., Наговицын В.А. Перспективы применения лазерного технологического оборудования в металлообработке . . . № 7

Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Михайловский И.А., Смирнов А.В. Расчетное определение параметров модели кулоновского трения посредством моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника автомобиля . . . № 2

Крук А.Т., Бойко А.Ю., Милушев Э.Х., Новокщёнов С.Л. Ножницы для отрезки заготовок упругой реакцией станины № 8

Лавриненко В.Ю. К 95-летию Евгения Ивановича Семёнова (1926—2016) № 11

Методы оценки микроструктуры стального плоского проката по ГОСТ 5640—2020 № 9

Муратов В.С., Казаков М.С. Влияние технологических режимов изготовления штампованных заготовок на прочностные свойства деталей ракетно-космической техники № 6

Обзор патентов по заготовительным производствам в машиностроении № 9

Указатель статей, опубликованных в 2021 г. № 12

Высокоэнергетические методы изготовления заготовок

Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Рыжков П.В., Зайцев Д.В. Определение критерия оценки деградации структуры синтезированного материала в процессе селективного лазерного сплавления жаропрочных сплавов № 3



Штамп для изготовления плоских колец сжатием

(патент на полезную модель RU 205070 U1, опублик. 25.06.2021,
авторы: Лавриненко В.Ю., Демин В.А., Поляков А.О., патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Полезная модель относится к обработке металлов давлением, а именно к устройствам для изготовления плоских колец, и может быть использована в качестве устройства для изготовления деталей типа кольцо из овальных заготовок во всех отраслях промышленности.

Техническим результатом предлагаемой полезной модели является возможность получения плоских кольцевых деталей с высокой заданной геометрической точностью и качеством при обеспечении требуемой производительности и снижении расхода металла. Кроме этого, отсутствует ограничение максимального диаметра изготавливаемых колец вследствие горизонтального расположения заготовки в штампе и отсутствия ограничений по закрытой высоте прессы.

Устройство позволяет вести процесс сжатия исходной овальной заготовки с овальным отверстием силой P с двух сторон пуансонами до достижения заготовкой требуемой формы кольца, его отличие состоит в том, что предусмотрено сжатие заготовки в горизонтальной плоскости, при этом заготовка все время деформирования находится между опорной плитой и прижимной крышкой, что препятствует потере ее устойчивости и обеспечивает требуемое качество получаемой кольцевой детали.

Штамп предлагаемой конструкции в исходном и конечном положениях изображен на рис. 1. Штамп состоит из цилиндрического хвостовика 1, соединенного с верхней плитой 2, на которой установлены упоры 3. Нижняя часть состоит из нижней плиты 4, опорной плиты 5, подвижных упоров 6, элементов сжатия (пуансонов) 7 и прижимной крышки 8. Прижимная крышка 8 соединена с опорной плитой 5 четырьмя болтами. Пуансоны 7 могут перемещаться в пазах опорной плиты 5, прижатой прижимной крышкой 8.

Исходную овальную заготовку устанавливают в полость опорной плиты 5 с помощью двух направляющих (на рис. 1, а не показаны). Верхнюю часть штампа прикрепляют к ползуну прессы с помощью цилиндрического хвостовика 1, после чего сила деформирования, направленная вертикально вниз через упоры 3, передается на подвижные упоры 6 и далее на пуансоны 7, которые начинают сжимать заготовку в горизонтальном положении.

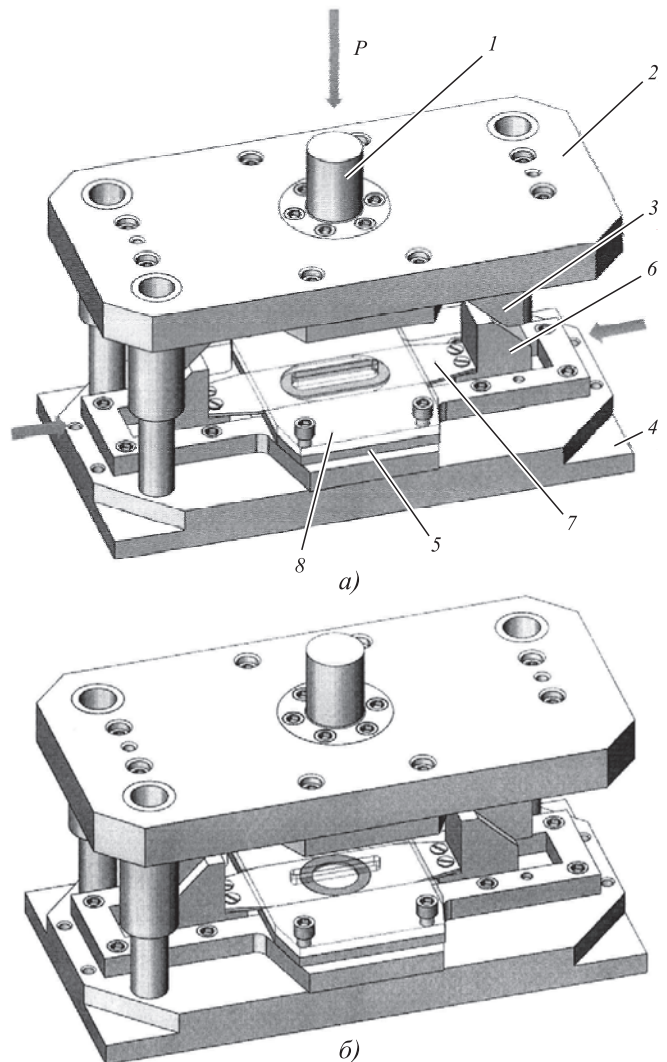


Рис. 1. Штамп предлагаемой конструкции в исходном (а) и конечном (б) положениях

При сжатии плоскостность заготовки обеспечивается постоянным зазором между опорной плитой 5 и прижимной крышкой 8.

Деформирование (сжатие) заготовки проводят до получения необходимого диаметра кольцевой детали. При этом для изменения типоразмера изготавливаемых колец, в частности, его наружного диаметра, достаточно провести замену пуансонов 7.

После достижения положения сжатия заготовки до требуемой формы кольца подвижные упоры, а следовательно, и пуансоны перемещаются за счет пружин (на рис. 1 не показаны) в исходное положение, а полученное кольцо удаляют из устрой-

ства, например, пружинным выталкивателем (на рис. 1 не показан).

В сравнении с изготовлением кольцевых деталей вырубкой из листа применение штампа предлагаемой конструкции для получения кольцевых деталей обеспечивает снижение расхода металла более чем в 1,5 раза при обеспечении требуемого качества колец.

Конструкция устройства позволяет установить его на обычном гидравлическом или кривошипном прессе, оборудованном автоматической или ручной загрузкой заготовок и удалением готовых деталей для обеспечения требуемой производительности.



**ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал
"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА
В МАШИНОСТРОЕНИИ"**

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

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

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

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. <http://www.mashin.ru>
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 25.10.2021. Подписано в печать 02.12.2021. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солишнз".
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.

Памяти Левы Шмульевича Шустера (07.01.1936–19.10.2021)

19 октября 2021 г. на 86-м году жизни скончался Лева Шмульевич Шустер, известный ученый в области трибологии в машинах и технологических процессах, заслуженный профессор Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ), профессор кафедры механики и цифрового проектирования УГАТУ, доктор технических наук.



Лева Шмульевич Шустер родился 7 января 1936 г. в г. Тирасполь Молдавской АССР. Окончил Иркутский авиационный техникум по специальности "Холодная обработка металлов резанием" и Уфимский авиационный институт по специальности "Технология машиностроения, металло-режущие станки и инструменты" с отличием.

С 1976 по 2000 г. Л.Ш. Шустер в Уфимском авиационном институте (ныне УГАТУ) прошел трудовой путь от младшего научного сотрудника кафедры "Резание металлов и режущего инструмента" до профессора, заведующего кафедрой "Детали машин и теории механизмов и машин". Последнее время работал в должности профессора кафедры "Основы конструирования механизмов и машин".

Лева Шмульевич создал научную школу высокотемпературной трибологии тяжело нагруженных сопряжений в машинах и механической обработке материалов. Его научный интерес представлял широкий спектр направлений: технология обработки материалов, трибология в машинах и технологических процессах, орто-

педия (исследование адгезионной составляющей трения в эндопротезах тазобедренного сустава).

Л.Ш. Шустер — автор более 500 статей в рецензируемых научных журналах, 13 монографий, 10 учебных пособий, 11 авторских свидетельств и патентов РФ.

Под руководством Левы Шмульевича подготовлено и защищено пять докторских и 12 кандидатских диссертаций.

Все научные достижения

Л.Ш. Шустера имеют практическое применение в различных отраслях экономики. Результаты научных достижений используются не только в России, но и за рубежом.

Лева Шмульевич оказывал научную поддержку предприятиям и организациям машиностроительной и авиационной промышленности, особое внимание уделял развитию научных направлений молодых ученых Технопарка "ХТЦ УАИ — РОСОЙЛ".

Л.Ш. Шустер — почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (1997 г.), заслуженный деятель науки Республики Башкортостан (2006 г.), награжден медалью "Ветеран труда", серебряной и двумя бронзовыми медалями ВДНХ, знаком "Изобретатель СССР".

Коллектив редакции и редакционный совет журнала выражают соболезнования в связи с кончиной Левы Шмульевича Шустера.