## ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ и производственный ЖУРНАЛ

## SAFOTOBINTENSHIBE TIPONSBOLICTBA в машиностроении

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

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

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

Зам. Главного **редактора** СЕРИКОВА Е.А.

#### Редакционный совет:

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

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

	<u>№</u> 5 май 2014
	СОДЕРЖАНИЕ
Литей	и́ное и сварочное производства
выплавляем	И., Солохненко В.В. Технологические возможности литья по ым моделям в формы из сыпучих жидкостекольных смесей в В.В., Малов Д.В. Точечная сварка листов алюминиевого сплава
Кузне	ечно-штамповочное производство
многослойно <b>Александро</b> выдавливани	А., Сапрыкин Б.Ю. Экспериментальное определение угла пружинения ого материала
Бровман Т.	В., Васильев М.Г. Способ вытяжки осесимметричных заготовок рительной деформацией
Прока	атно-волочильное производство
•	., Халипов И.В. Определение величины и направления сил, к на рабочий валок маятниковой прокатной клети
Матер	риаловедение и новые материалы
Московского Голобоков и среднеуглери качения . Волков Г.М.	А.А. К 75-летию кафедры "Технология конструкционных материалов" государственного машиностроительного университета (МАМИ) А.В., Волков Р.Б., Черепахин А.А., Кузнецов В.А. Новая одистая сталь повышенного качества для деталей подшипников
Инфо	рмация
Мельник М.: педагогов-инрабочих для Дорошина И химического	В., Ямпольский В.М. Анализ системы подготовки будущих иженеров по специальности "Мастер производственного обучения сварочного производства"
	Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ ий для публикации трудов соискателей ученых степеней
и науки Россі L	Журнал выходит при содействии: Проблем Качества Российской Федерации; Министерства образования ийской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прес [НИИЧермет; ВНИИМЕТМАШ; ИМЕТ РАН; Каширского завода ит"; АМУРМЕТМАШ; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; ФГУП ГНПП "Сплав"

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых

в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со

ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

"Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении",

## **SCIENTIFIC TECHNICAL** AND PRODUCTION JOURNAL

## BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

Mav Nº 5

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

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

**Editorial Assistant** SERIKOVA E.A.

**Editorial Committee:** BELYAKOV A.I.

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

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

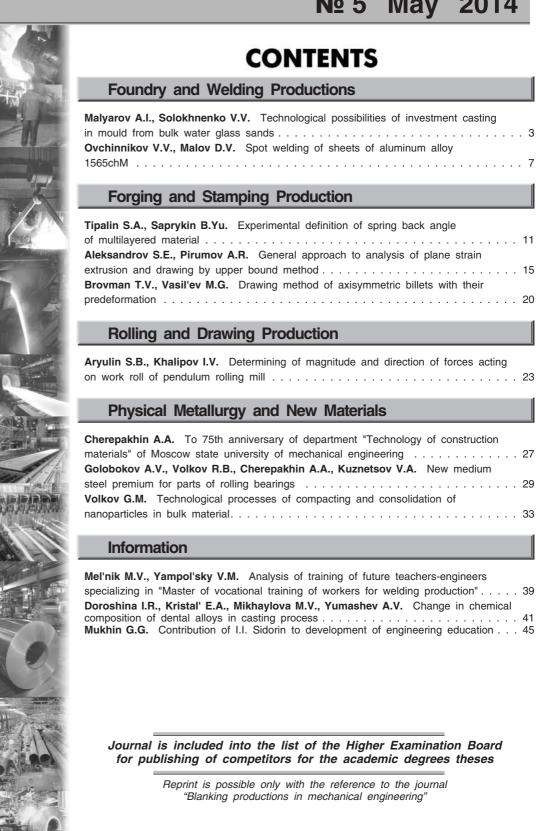
TUTMANN T.

ERXLEBEN S.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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



## ЛИТЕЙНОЕ И СВАРОЧНОЕ

## LIPONSBOTCIBY



УДК 621.74.045

**А.И. Маляров**, В.В. Солохненко (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))

# Технологические возможности литья по выплавляемым моделям в формы из сыпучих жидкостекольных смесей

Приведены примеры реализации метода литья по выплавляемым моделям в формы из жидкостекольных смесей с жидкими отвердителями для изготовления машиностроительных отливок.

**Ключевые слова:** литье по выплавляемым моделям; жидкостекольные смеси с жидкими отвердителями; машиностроительные отливки; комбинированная модельная оснастка.

Examples of implementing of investment casting method in the moulds made of water glass sands with liquid hardeners for the manufacture of engineering castings are given.

**Keywords:** investment casting; water glass sands with liquid hardeners; engineering castings; combined attern equipment.

В настоящее время широкое распространение получило литье в формы из холоднотвердеющих смесей (ХТС), полученные по постоянным моделям. Применение ХТС позволяет значительно повысить точность отливок и улучшить качество их поверхности по сравнению с литьем в песчано-глинистые формы.

Отливки сложной конфигурации получают литьем по выплавляемым, выжигаемым или газифицируемым моделям с использованием оболочковых керамических форм и вакуумно-пленочной формовки [1]. Эти методы отличаются сложностью и продолжительностью технологического процесса, кроме этого, они значительно дороже литья в формы из XTC.

Специалистами кафедры "Машины и технологии литейного производства" Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ) разработан метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) в формы из сыпучих жидкостекольных смесей с жидкими отвердителями (ЖССЭ). Он позволяет получать отливки сложной конфигурации с литой равномерно шероховатой поверхностью (Rz = 70...80 мкм).

Первоначально этот метод был использован при изготовлении художественных отливок (рис. 1).

К преимуществам метода ЛВМ в формы из ЖС СЭ следует отнести минимальные выделения вредных веществ, загрязняющих воздух, и минимальные затраты на формовочные материалы.

Однако получение отливок с глубокими полостями и поднутрениями при использовании сыпучих жидкостекольных смесей вызывает значительно большие трудности, чем при использовании жидких формовочных смесей. Ни один из известных способов уплотнения не позволяет уплотнить смесь со всех сторон модели одновременно.

Для получения сложных отливок предложенным методом были разработаны и реализованы несколько вариантов конструкций литейных форм и способов их изготовления.

Неразъемная литейная форма (рис. 2) из сыпучей смеси по легкоплавкой модели была получена путем последовательного уплотнения смеси с двух противоположных сторон съемную опоку на вибростоле. Модель I и съемную опоку 4 устанавливали на плоской модельной плите. Смесь уплотняли вибрацией с ручным подуплотнением под спиральным выступом модели. После уплотнения смеси в опоке 4 ее переворачивали и, установив вторую съемную опоку, вибрацией уплотняли в ней смесь. Модель выплавляли в положении формы чашей 2 вниз.

На рис. 3 показана отливка, полученная в неразъемную безопочную форму с использованием фальшивой опоки. Тонкие и глубокие отверстия 1 и 2 получены ручным уплотнением смеси в полостях модели перед ее формовкой в опоке.

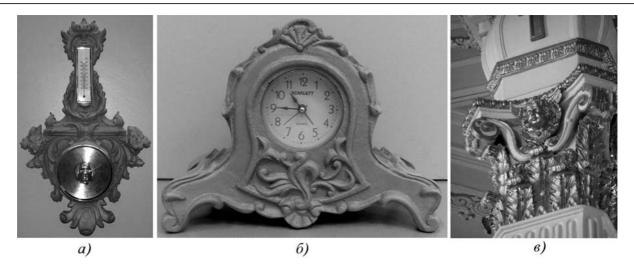


Рис. 1. Домашний барометр-термометр (a), каминные часы ( $\delta$ ) и капитель храма Успения Пресвятой Богородицы на Успенском Вражке (отливка в центре) (s)

Приведенные варианты формовки позволяют реализовать важное преимущество XTC — применение безопочной формовки. Однако из-за невысокой производительности эти способы пригодны для небольших партий машиностроительных и художественных отливок. Для серийного производства следует применять отдельно изготовляемые песчаные стержни, устанавливаемые в пресс-форму перед запрессовкой в нее модельного состава.

Использование неразъемных форм из ХТС приводит к значительным потерям модельного состава при выплавлении моделей из форм. Модельный состав выплавляют горячим воздухом при температуре 180 °C. Плавящийся модельный состав частично проникает в поры смеси, а при прокалке при температуре 400 °C выгорает или коксуется.

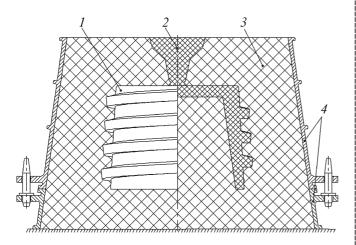


Рис. 2. Схема получения неразъемной литейной формы в съемной опоке:

1 — легкоплавкая модель; 2 — модель литниково-питающей системы; 3 — жидкостекольная смесь; 4 — съемные опоки

Применение полых моделей [2] и моделей, изготовленных из паст с замешанными пузырьками воздуха (пористых легкоплавких моделей), позволяет существенно снизить потери модельного состава по сравнению с монолитными моделями.

Более производительным и экономичным с точки зрения потерь модельного состава является использо-

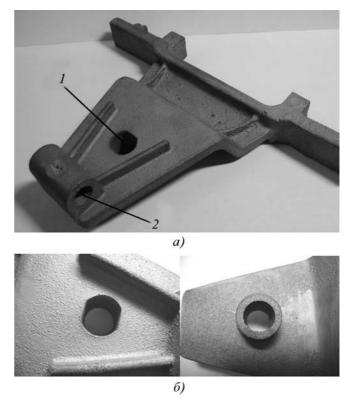


Рис. 3. Отливка с тонкими отверстиями, полученными предварительным уплотнением смеси в модели (a) и вид на отверстие 1 с двух сторон стенки отливки  $(\delta)$ 

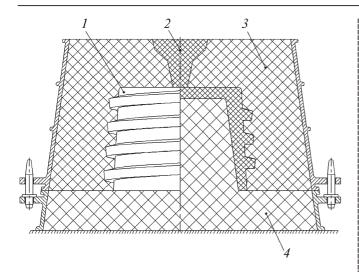


Рис. 4. Конструкция разъемной литейной формы в съемной опоке:

1 — легкоплавкая модель; 2 — модель литниково-питающей системы; 3 — полуформа верха с моделью; 4 — полуформа низа

вание разъемных форм, предложенных в патенте [3]. Конструкция такой формы показана на рис. 4. Отливку при этом располагают в одной полуформе 3, а вытопку модели проводят только из полуформы 3 в положении моделью 1 вниз.

Использование полых и пористых легкоплавких моделей в этом случае позволяет увеличить процент возврата модельного состава до 98 %.

Для изготовления отливок со сложными внутренними полостями переменного сечения была разработана конструкция выплавляемых моделей с вентами [4]. Модель такой конструкции была использована для изготовления отливки, показанной на рис. 5.

Конструкция пресс-формы для изготовления легкоплавкой модели предусматривает возможность установки в нее двухсторонних металлических или пластмассовых вент перед запрессовкой модельного состава.

На рис. 6 приведена легкоплавкая модель с вентами, заформованная в ХТС. Вначале на стол пескодувной машины устанавливали плиту с моделью *1* и верх-

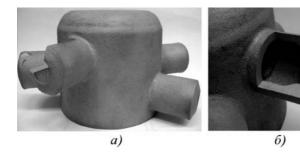


Рис. 5. Отливка, изготовленная по модели с вентами (a) и полость переменного сечения в боковом элементе отливки (б)

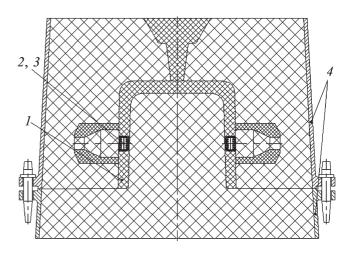


Рис. 6. Форма в съемных опоках:

1 — легкоплавкая модель; 2, 3 — двухсторонние венты; 4 — съемные опоки

нюю часть съемной опоки 4. В плите под моделью располагалось отверстие для выхода воздуха, проходящего через венты (2, 3) в полость модели.

Смесь в опоке уплотняли пескострельным способом при давлении в ресивере машины 0,35 МПа. При таком давлении разрушение выплавляемой модели в процессе формовки не происходит. Заметных следов воздействия уплотняемой смеси на поверхность модели также не наблюдается.

Однако при пескодувном уплотнении расстояние от вдувных отверстий до поверхности модели должно быть более 30 мм. При меньшем расстоянии на поверхности модели образовывался нарост толщиной 0,8...0,12 мм из пылевидных частиц смеси. Этот нарост отображался на поверхности отливки.

После уплотнения и предварительного отверждения смеси в верхней полуформе ее переворачивали и уплотняли смесь в нижней съемной опоке.

После затвердевания смеси форму разбирали и полуформу с моделью отправляли на вытопку и прокалку. При выплавлении венты вместе с модельным составом вышли из формы, не повредив ее.

Для изготовления крупной серии сложных отливок, таких как "колесо турбины" (рис. 7), разработана комбинированная модельная оснастка (рис. 8). Основная модель 1 выполнена из легкоплавкого модельного состава, а нижняя плита 2 служит фасонным подмодельным щитком при пескодувном уплотнении полуформы верха. Кроме того, в ней расположены венты 3, обеспечивающие заполнение полостей между лопатками турбины.

При изготовлении серий мелких отливок для удобства заливки и экономии металла на литниковой системе используют различные по конструкции много-

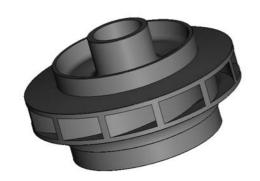
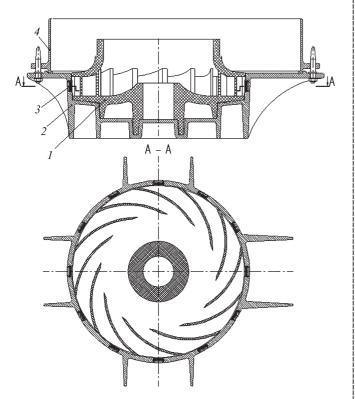


Рис. 7. Колесо турбины



**Рис. 8. Комбинированная модельная оснастка:** 1 — легкоплавкая модель; 2 — фасонная модельная плита; 3 — венты (12 шт.); 4 — опока

местные формы. На рис. 9 показаны пресс-форма для получения модельного звена отливок "проушина амортизатора" и безопочная форма из ХТС для стопочной заливки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Технология** литейного производства. Специальные виды литья: учеб. для студ. вузов / Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин; под ред. В.А. Рыбкина. М.: Издательский центр "Академия", 2005. 352 с.
- 2. Пат. 77564 РФ, МПК (51) В 22 С 9/04. Блок моделей из воскообразных материалов для литья художественных изделий / В.К. Дубровин, О.М. Пашнина; заявитель и патенто-

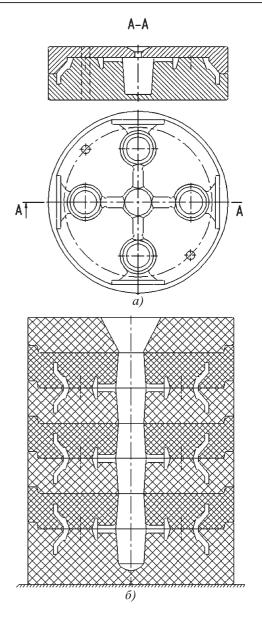


Рис. 9. Пресс-форма для получения модельного звена отливок "проушина амортизатора" (a) и безопочная форма из ХТС для стопочной заливки ( $\delta$ )

обладатель Южно-Уральский гос. ун-т. № 2008116189/22; заявл. 24.04.2008; опубл. 27.10.2008.

- 3. Пат. 124606 РФ, МПК (51) В 22 С 9/04. Литейная форма / А.И. Маляров, А.Ю. Лашина, В.В. Солохненко, заявитель и патентообладатель А.И. Маляров, А.Ю. Лашина, В.В. Солохненко. № 2011113522/02; заявл. 08.04.2011; опубл. 10.02.2013.
- 4. Пат. 130890 РФ, МПК (51) В 22 С 9/04. Выплавляемая модель / А.И. Маляров, В.В. Солохненко, А.В. Перевалов; заявитель и патентообладатель А.И. Маляров, В.В. Солохненко, А.В. Перевалов. № 2013110338/02; заявл. 11.03.2013; опубл. 10.08.2013.

Аркадий Ильич Маляров, канд. техн. наук, mai1940@yandex.ru;

Василий Васильевич Солохненко

УДК 621.791.754.293

В.В. Овчинников, Д.В. Малов

(Московский государственный индустриальный университет)

## Точечная сварка листов алюминиевого сплава 1565чМ

Приведены результаты исследования формирования точечного соединения при сварке листов алюминиевого сплава 1565чМ ручной аргонодуговой сваркой, сваркой трением с перемешиванием и контактной точечной сваркой. Разработана технология точечной аргонодуговой сварки листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм. Металлографический анализ и механические испытания сварных образцов показали хорошие прочностные свойства и отсутствие дефектов в сварных точечных соединениях.

**Ключевые слова:** точечная сварка; сварка трением с перемешиванием; контактная сварка; переменный ток; алюминиевый сплав; параметры точки; структура; прочность соединения.

The results of investigating the formation of point connection with welding of the sheets of the aluminum alloy 1565chM by manual argon-arc welding, friction welding with the mixing and the resistance spot welding are presented. The technology of the spot argon-arc welding of the sheets of the alloy 1565chM with thickness of 5 mm is developed. The metallographic analysis and the mechanical tests of the welded models of demonstration whether good strength properties and the absence of defects in the welded point joints.

**Keywords:** spot welding; friction welding with mixing; resistance welding; alternating current; aluminum alloy; parameters of point; structure; strength of joint.

Введение. Алюминиевые сплавы в настоящее время остаются перспективным материалом для изготовления сварных конструкций. Конструкции из алюминиевых сплавов широко применяют в ракетостроении и авиационной технике. Однако существующие технологии сварки сложны, процесс их реализации трудоемок, стоимость оборудования высокая.

В последние годы наметилась устойчивая тенденция к росту объемов использования алюминиевых сплавов для изготовления цистерн автомобилей бензо- и цементовозов, кузовов легковых и грузовых автомобилей, железнодорожных вагонов и др. [1—4].

Большой интерес вызывают точечные соединения алюминиевых сплавов. Такой тип соединения в несколько раз снижает материалоемкость и повышает производительность по сравнению с контактной точечной сваркой (ТЭС).

Для формирования точечных сварных соединений из алюминиевых сплавов чаще всего применяют сварку неплавящимся электродом в аргоне как постоянным, так и переменным током однофазной и трехфазной свободной и сжатой дугой [5, 6]. Также получает распространение сварка трением с перемешиванием (СТП), однако исследований в этой области мало.

*Цель работы* — обобщение результатов исследований технологических особенностей точечной сварки листов сплава 1565чМ и определение параметров режимов, при которых обеспечивается наиболее высокая прочность соединений.

**Методика исследования.** Исследования формирования сварного точечного соединения проводили на листах сплава 1565чМ толщиной (5+5) мм.

Контактную точечную сварку выполняли на машине МТВ-8002.

Для сварки трением с перемешиванием точечных соединений применяли горизонтальный фрезерный

станок Agile CS 1000, оснащенный специальным инструментом для СТП. Инструмент выполнен в виде державки со сменным наконечником, состоящим из заплечика и индентора, на поверхности которого выполнена винтообразная канавка. Индентор диаметром 5 мм имел высоту 7,0...7,5 мм для гарантированного соединения свариваемых листов. Частоту вращения инструмента варьировали в интервале 500...1000 об/мин, а время его погружения в соединяемые листы — в интервале 10...60 с.

При точечной аргонодуговой сварке (АрДС) проводится проплавление верхнего и частично нижнего листов. Учитывая большую толщину верхнего листа (5 мм), для облегчения его проплавления в нем было выполнено отверстие в соответствии с ГОСТ 14806—80. При подготовке образцов к аргонодуговой сварке изменяли диаметр отверстия в верхнем листе и глубину зенкования данного отверстия (рис. 1).

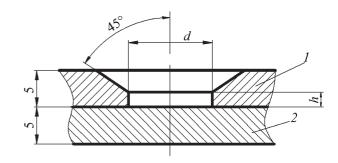


Рис. 1. Подготовка листов к аргонодуговой сварке точечного соединения:

1, 2 — верхний и нижний листы соответственно; d — диаметр отверстия в верхнем листе; h — высота цилиндрической части отверстия (глубина зенкования)

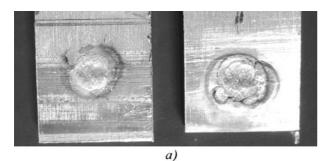
1. Прочность сварных точечных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных различными способами сварки

Способ сварки	Разрушаю- щая сила, кН	Прочность, МПа	Характер разрушения соединения при испытаниях
АрДС	4852* 50	152,1159,1 155,8	Разрушение по металлу сварной точки; срез сварной точки по литому металлу
СТП	<u>3638</u> <u>37</u>	317,5322,5 319,7	Разрушение про- исходит вокруг
ТЭС	11,523,0 18,0	288,2305,5 297,8	ядра точки с вы- рывом по пери- метру точки

 $<sup>^*</sup>$ В числителе приведены минимальное и максимальное значения, а в знаменателе — среднее значение.

Прочность сварных точечных соединений определяли по ГОСТ 6996—66 на образцах шириной 20 мм.

Макроструктуру сварных соединений, а также характер их разрушения исследовали с помощью цифрового стереоскопического микроскопа Motic DM-39C-N9GO-A.



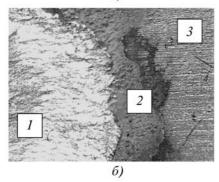


Рис. 2. Сварное точечное соединение, выполненное аргонодуговой сваркой, после испытания на прочность (a) и поясок оксидов вокруг сварной точки ( $\delta$ ):

 $a - \times 5$ ;  $\delta - \times 15$ :

1- литое ядро сварной точки; 2- поясок оксидов вокруг точки, сформированный во время сварки; 3- основной металл

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты механических испытаний на прочность полученных сварных соединений приведены в табл. 1.

По разрушающей силе сварные точечные соединения, полученные аргонодуговой сваркой, превосходят соединения, выполненные точечной контактной сваркой и сваркой трением с перемешиванием. При этом прочность соединения является самой низкой, по-видимому, вследствие характера разрушения соединения с наличием среза по металлу сварной точки (рис. 2, a).

В изломе соединения можно выделить три зоны (рис. 2,  $\delta$ ): литой металл сварной точки (зона I), по которому произошло разрушение, поясок оксидов (зона 2), который сформировался из-за высокой температуры нагрева и присутствия воздуха в стыке между листами; зона неокисленного основного металла (зона 3).

Испытания образцов соединений, выполненных ТЭС, показали, что разрушение точки происходит по уплотняющему пояску вокруг литого ядра (рис. 3). При этом сварная точка не разрушается.

Можно отметить увеличение прочности сварной точки, выполненной ТЭС, по сравнению с соединением, полученным ручной аргонодуговой сваркой. Прочность увеличивается до 297,8 МПа, хотя разрушающая сила на точку уменьшается до 18 кН.

Использование ТЭС для соединения листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм ограничено с точки зрения применимости процесса в условиях сборки вагонов и режимов сварки. Соединение листов толщиной 5 мм осуществляется на самой высокой ступени работы трансформатора машины МТВ-8002, но диаметр получаемых сварных точек оказывается уменьшенным — не более 8 мм.

Соединения, выполненные СТП, разрушались аналогично соединениям, выполненным ТЭС, — по уплотняющему пояску вокруг ядра соединения с вырывом точки из одного из листов (рис. 4, a). Обращает на себя внимание вихревой характер течения металла вокруг ядра соединения. При этом наблюдается отсутствие интенсивного окисления металла в зоне воздействия заплечика инструмента (рис. 4,  $\delta$ ).

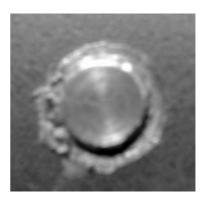
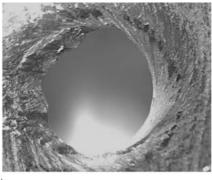


Рис. 3. Разрушение соединения, выполненного ТЭС, при испытаниях по периметру сварной точки (×8)





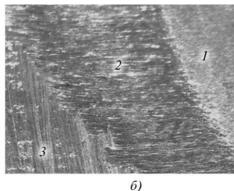


Рис. 4. Сварное точечное соединение, выполненное сваркой трением с перемешиванием, после испытания на прочность (a) и поясок оксидов вокруг сварной точки ( $\delta$ ):

a — ×5;  $\delta$  — ×15: I — литое ядро сварной точки; 2 — поясок оксидов вокруг точки, сформированный во время сварки;  $\beta$  — основной металл

Прочность сварного соединения, выполненного СТП, составляет 319 МПа, что превышает прочность соединений, полученных ручной аргонодуговой сваркой и ТЭС, в то время как разрушающая сила на точку составила 37 кН (примерно 72...75 % от разрушающей силы при аргонодуговой сварке).

Учитывая, что ручная аргонодуговая сварка и СТП представляют большой интерес при изготовлении и монтаже кузова грузового вагона, дальнейшие исследования были направлены на повышение прочности и разрушающей силы на сварную точку при использовании данных способов сварки.

Для увеличения прочности сварного соединения при аргонодуговой сварке необходимо, чтобы из зоны формирования сварной точки между двумя листами эффективно были удалены оксиды, обеспечено гарантированное проплавление нижнего листа на 34...40 % его толщины, а в сварной точке отсутствовали дефекты типа пор и трещин. Поэтому были проведены механические испытания на прочность точечных соединений, сваренных при различных диаметрах отверстия, предварительно высверленного в верхнем листе (см. рис. 1). Диаметр отверстия варьировали в интервале 5...12 мм.

Эксперименты показали, что при диаметре отверстия в верхнем листе 5...7 мм при сварке точечного соединения наблюдается быстрое оплавление нижней кромки отверстия, перебрасывание дуги на отверстие в верхнем листе и, как следствие, малая глубина проплавления нижнего листа и загрязненность металла литой точки оксидными включениями. В этом случае прочность соединения и разрушающая сила будут низкими (рис. 5).

При диаметре отверстия в верхнем листе 7,5...9,0 мм в начальный момент времени дуга расплавляет нижний лист, и только затем расплавляется верхний лист с формированием общей сварочной ванны. Из-за вытеснения фрагментов оксидных пленок к периферии сварной точки значительно возрас-

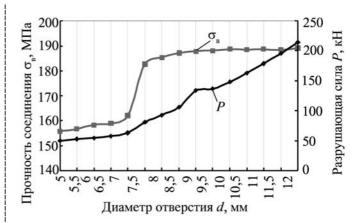


Рис. 5. Зависимость прочности и разрушающей силы точечного соединения, выполненного аргонодуговой сваркой, от диаметра отверстия в верхнем листе

тают разрушающая сила и прочность соединения (см. рис. 5).

При увеличении диаметра отверстия в верхнем листе свыше 9,5 мм происходит стабилизация значений прочности сварного соединения при возрастании разрушающей силы. Одновременно в этом случае повышаются трудоемкость выполнения соединения и вероятность возникновения внутренних дефектов в сварной точке, связанная с увеличением доли присадочной проволоки.

Поэтому оптимальным диаметром отверстия в верхнем листе является диапазон 7,5...9,0 мм (1,5...1,8 толщины листа).

Макроструктура металла сварной точки для сочетания толщин (5+5) мм приведена на рис. 6. В литой зоне наблюдаются мелкозернистая структура и плотное прилегание тела шва к листам. Обе пластины проплавлены. Дефекты (трещины, поры, включения) в различных зонах сварного соединения не выявлены.

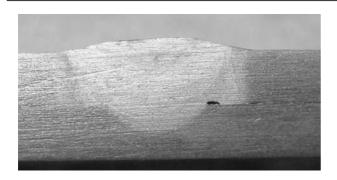


Рис. 6. Макроструктура сварной точки листов сплава 1565чМ толщиной (5+5) мм при диаметре отверстия в верхнем листе 8,5 мм

В случае применения СТП для выполнения точечных соединений прочность сварного соединения и разрушающая сила зависят от формы рабочего инструмента. При переходе от плоской (рис. 7, a) рабочей поверхности заплечника рабочего инструмента к радиусной выпуклой (рис. 7,  $\delta$ ) при формировании соединения возникают перемещения металла от центра сварной точки к периферии.

Эти потоки способствуют разрушению оксидных пленок в нагретой до пластичного состояния зоне соединения (см. рис. 4,  $\theta$ , зона 2) и формированию металлических связей между листами в твердой фазе. Данное явление приводит к росту прочности соединения и разрушающей силы (табл. 2).

Результаты исследования технологических особенностей сварки точечными соединениями листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм показали, что при использовании ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом на переменном токе диапазон изменения параметров процесса ограничен. Отклонение от оптимальных режимов приводит к непровару нижнего листа и снижению прочности соединения.

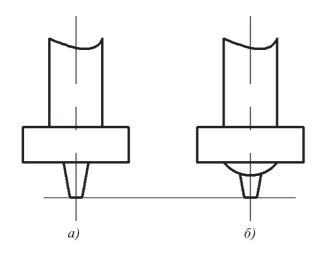


Рис. 7. Рабочий инструмент для СТП точечных соединений с плоской (a) и сферической  $(\delta)$  рабочей поверхностью заплечника

2. Влияние формы рабочей поверхности заплечника инструмента для СТП на прочность и разрушающую нагрузку точечных соединений листов сплава 1565чМ

Форма рабочей заплечника и		Прочность	Разрушаю-	
Вариант исполнения Эскиз		соединения, МПа	щая сила, кН	
Плоская	Рис. 7, а	319,7	37	
Сферическая	Сферическая Рис. 7, б		63	

#### Выволы

- 1. Определены ориентировочные параметры отверстия в верхнем листе при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом на переменном токе точечных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм. Оптимальным является диапазон диаметром отверстия 7,5...9,0 мм.
- 2. При сварке трением с перемешиванием точечных соединений листов сплава 1565чМ прочность сварного соединения составляет 318...325 МПа, а разрушение соединения при испытаниях происходит по типу соединений, выполненных ТЭС, с вырывом ядра соединения.
- 3. Для повышения разрушающей силы при СТП точечных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм целесообразно применять рабочий инструмент с радиусной выпуклой рабочей поверхностью заплечника.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Дриц А.М., Овчинников В.В., Растопчин Р.Н. Исследование свойств сварных соединений сплава 1565ч применительно к изготовлению сварных цистерн // Цветные металлы. 2012. № 12. С. 85-89.
- 2. Дриц А.М., Овчинников В.В. Свойства сварных соединений листов сплава 1565ч в сочетании с другими алюминиевыми сплавами // Цветные металлы. 2013. № 11. С. 84—89.
- 3. Дриц А.М., Овчинников В.В., Растопчин Р.Н. Технологические свойства листов из свариваемого алюминиевого сплава 1565ч для производства цистерн // Технология легких сплавов. 2012.  $\mathbb{N}$  3. С. 20–29.
- 4. **Овчинников В.В.** Современные наукоемкие технологии в сварочном производстве // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2011. № 5. С. 35–45.
- 5. **Сидоров В.П., Троицкий В.А.** Влияние давления неподвижной дуги на формирование прожога // Сварка и контроль. Челябинск, 2005. 156 с.
- 6. **Дриц А.М.**, **Овчинников В.В.** Сварка трением с перемешиванием нахлесточных соединений сплава 1460 // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 1. С. 11–16.

Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук, vikov1956@mail.ru; Дмитрий Валерьевич Малов

## КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО



УДК 621.7.043

С.А. Типалин, Б.Ю. Сапрыкин

(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))

# Экспериментальное определение угла пружинения многослойного материала

Приведены экспериментальные исследования пружинения многослойного материала и сопоставление их с однородным материалом. Предложены варианты прогнозирования пружинения для многослойных листовых материалов типа металл–полимер–металл.

**Ключевые слова:** изгиб листа; пружинение; остаточные напряжения; многослойные материалы; изгибающий момент.

The experimental researches of the spring back for laminated sheet metals are given. Solution to the problem of the spring back for multilayered sheet metals such as metal-polymer-metal are offered.

Keywords: bending metal sheet; spring back; residual stresses; multilayered materials; bending moment.

Многослойные демпфирующие материалы, представляющие собой сэндвич-панели "сталь-полимер-сталь", применяют не только в авиационной отрасли, но и находят широкое распространение в машиностроении.

Преимущество данных материалов заключается в сочетании прочностных свойств конструкции со способностью поглощать звуковые колебания и вибрации. Благодаря этой особенности отпадает необходимость нанесения дополнительных шумопоглощающих материалов, что упрощает сборочные работы, снижает массу готовой конструкции и, как следствие, уменьшает ее стоимость [1].

Проблемой пружинения при операциях листовой штамповки занимались многие известные российские и зарубежные ученые: С.И. Губкин, М.Н. Горбунов, В.И. Ершов, М.Е. Зубцов, Е.И. Исаченков, Ю.Г. Калпин, М.И. Лысов, Н.Н. Малинин, А.Д. Матвеев, Е.Н. Мошнин, В.С. Бондарь, Е.А. Попов, Г.А. Смирнов-Аляев, А.Д. Томленов и др [2–5].

Самым распространенным решением для определения угла пружинения  $\Delta\alpha$  является формула, предложенная В.П. Романовским, для свободной V- и U-образной гибки:

для V-образной свободной гибки:

$$tg \Delta \alpha = 0,375 \frac{l}{(1-x) s} \frac{\sigma_{\scriptscriptstyle T}}{E}; \qquad (1)$$

для U-образной свободной гибки:

tg 
$$\Delta \alpha = 0.75 \frac{r_{\rm M} + r_{\rm \Pi} + 1.25 \, s}{(1 - x) \, s} \frac{\sigma_{\rm T}}{E}$$
, (2)

l — длина изгибаемого участка; x — расстояние до средней линии;  $\sigma_{\rm T}$  — предел текучести; s — толщина материала; E — модуль упругости;  $r_{\rm M}$ ,  $r_{\rm T}$  — радиус скругления матрицы и пуансона.

В работах Е.А. Попова, посвященных изгибу и пружинению, имеются допущения и предположения, что при толщине, меньшей, чем радиус гибки, зона немонотонной деформации мала, длина нейтральной поверхности остается неизменной, поворот осуществляется по слою, с которым совпадает нейтральная поверхность.

Угол пружинения представлен зависимостью от радиуса и толщины образца с учетом линейной аппроксимации кривой упрочнения материала:

$$\Delta \alpha = \frac{3/2 \,\sigma_{_{\rm T}} + \Pi \frac{s}{2r+s}}{E} \left(\frac{r}{s} + 1\right) \alpha \,, \tag{3}$$

где r — радиус гибки;  $\Pi$  — модуль упрочнения;  $\alpha$  — угол изгиба.

Однако изменения угла пружинения от угла изгиба представлены прямой зависимостью, что не всегда согласуется с экспериментальными данными.

В работах многих исследователей изменение угла изгиба рассчитывают через радиус кривизны, что вызывает трудности при расчетах деталей для гибки в штампах. Это связано с тем, что при гибке в штампах подгибаемые полки претерпевают сложную деформацию (изгибаясь при свободном изгибе, и впоследствии распрямляясь при соприкосновении пуансона и матрицы).

Большинство теорий также имеет линейную зависимость между геометрическими параметрами и углом пружинения, но для более полной картины при прогнозировании пружинения требуются нелинейные зависимости, отдельно для малых и больших радиусов гибки. Данные зависимости приведены в работе И.А. Норицына, Ю.Г. Калпина (Определение угла пружинения при одноугловой гибке // Вестник машиностроения. 1968. № 1. С. 63–66).

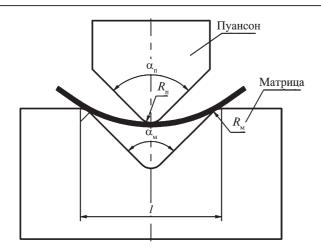


Рис. 1. Схема гибки

При больших радиусах гибки:

$$\Delta \alpha = \frac{3 \sigma_{\tau} \rho_{0} (\pi - \alpha)}{E s} + \frac{\Pi}{E} (\pi - \alpha), \qquad (4)$$

при малых радиусах гибки:

$$\Delta\alpha \approx \frac{3\sigma_{\rm T} \rho_0 (\pi - \alpha)}{Es} + \frac{\Pi}{E} (\pi - \alpha) + \frac{6\rho_0 \sigma_{\rm T}}{Es \, \text{tg} \left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \frac{l \sigma_{\rm T}}{Es \, \text{sin} \left(\frac{\alpha}{2}\right)},$$
(5)

где  $\rho_0$  — радиус изгиба по среднему слою.

Для выбора способа расчета пружинения многослойного материала проведены серии экспериментов по определению угла пружинения многослойного материала типа металл—полимер—металл.

Исследование проводили на универсальной испытательной машине P-20. Гибке подвергали образцы размерами  $40\times100$  мм из антифона (многослойный материал с толщиной связующего упруго-вязкого слоя 0,05 мм) толщиной 1; 1,5 и 2 мм и листовой стали 08кп (однослойный материал) с такими же толщинами. Угол инструмента и угол детали после снятия нагрузки измеряли с помощью угломера.

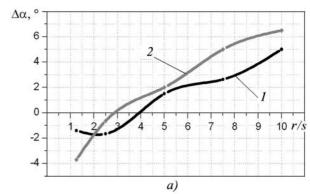


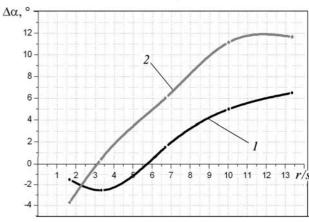
Рис. 2. Оснастка

При изучении влияния радиуса гибки на угол пружинения использовали пуансон с углом 90° и радиусами закругления 2,5; 5; 10; 15 и 20 мм.

При изучении влияния угла гибки применяли пуансон радиусами закругления 2,5 и 20 мм и углами 60; 90 и 120°.

Схема гибки приведена на рис. 1. Оснастка (пуансоны и матрица), использованная в ходе исследования, показана на рис. 2.





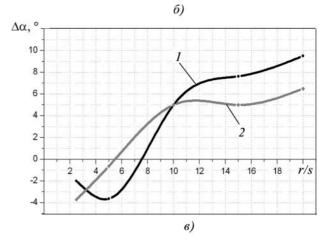


Рис. 3. Зависимости угла пружинения  $\Delta$   $\alpha$  от относительного радиуса закругления r / s при угле гибки  $\alpha = 90^\circ$ :

 $a,\, \delta$  — сталь 08 кп и антифон толщиной 2 и 1,5 мм соответственно; s — сталь 08 кп толщиной 1 мм и антифон толщиной 2 мм; I — однослойный материал; 2 — многослойный материал

По данным, полученным в ходе опытов, были построены графики зависимости угла пружинения от относительного радиуса закругления пуансона при угле гибки 90° для стали и антифона толщиной 2 и 1,5 мм, и для стали толщиной 1 мм и антифона толщиной 2 мм от радиуса гибки. Результаты сравнения представлены на рис. 3 и 4.

Получили, что у многослойных материалов, так же как и у однослойных, угол пружинения растет с увеличением радиуса гибки. При малых радиусах гибки у обоих материалов угол пружинения отрицательный.

Учитывая, что многослойный материал состоит из двух стальных слоев, соединенных клеевой прослойкой, он имеет пружинение примерно в 1,5 раза выше для всех исследованных толщин и радиусов гибки по сравнению с однослойной сталью. Исключение может составлять радиус 5 мм, при котором сталь имеет большее пружинение. При малых радиусах гибки пружинение у многослойного материала максимально при угле 90°, которое в 1,5 раза выше, чем при больших углах гибки, и в 2 раза выше, чем при малых углах.

Данные экспериментов были сравнены с результатами расчета по формулам (4) и (5) по двум вариантам:

- 1) с полной толщиной многослойного образца s;
- 2) с половиной от толщины образца (один слой металлической части двухслойной составляющей s/2).

В качестве примера показано сравнение образца толщиной 2 мм. Результаты приведены на рис. 5.

Как видно из графиков на рис. 5, теоретически определить пружинение для многослойного материала с неотвержденным упруговязким слоем по формулам (4) и (5) невозможно. Основные теории, учитывающие пружинение, относятся к однородному по толщине материалу, поэтому их использование для многослойных конструкций неприменимо, так как это приводит к неточностям при расчете.

Использование усредненных показателей для комбинированных материалов возможно только для симметричных биметаллов. При возможности смещения слоев в процессе деформации между собой (в случае упругого и вязкоупругого соединительного слоя) неприемлемо применение усредненных параметров. В этом слу-

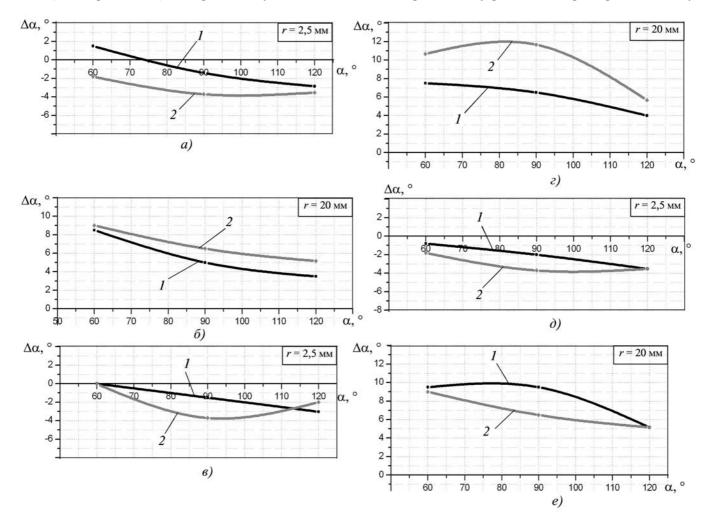
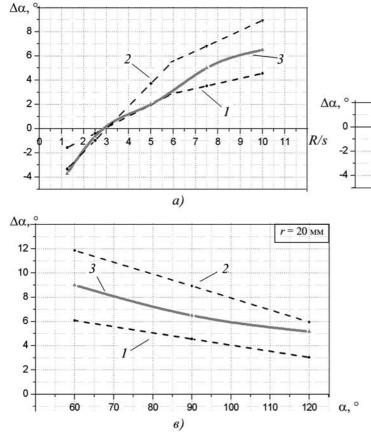


Рис. 4. Зависимости угла пружинения  $\Delta \alpha$  от угла  $\alpha$  и радиуса гибки r: a,  $\delta$  — сталь 08кп и антифон толщиной 2 мм;  $\theta$ ,  $\varepsilon$  — сталь 08кп и антифон толщиной 1,5 мм;  $\theta$ ,  $\varepsilon$  — сталь 08кп толщиной 1 мм и антифон толщиной 2 мм; I — однослойный материал; I — многослойный материал



r = 2,5 MM r = 2,5 MM

Рис. 5. Зависимости угла пружинения  $\Delta \alpha$  от относительного радиуса закругления r/s (a), угла  $\alpha$  ( $\delta$ , s) и радиуса гибки r для образца толщиной 2 мм:

I — расчет с полной толщиной; 2 — расчет с половины толщины; 3 — результаты эксперимента

чае требуется введение дополнительных параметров, таких как напряжение контакта между слоями.

Для упрощенного расчета заготовок сталь—полимер—сталь, где возможно смещение металлических слоев, можно использовать формулы (4) и (5) с некоторой доработкой. По результатам экспериментов, предложено ввести в формулы (4) и (5) замену толщины материала s на приведенную толщину  $s_{\text{пр}}$ :

$$s_{\text{np}} = s_1 + k s_2,$$
 (4)

где  $s_1$ ,  $s_2$  — толіцина 1-го и 2-го слоя соответственно; k — коэффициент, зависящий от относительной силы сдвига.

Коэффициент k позволит учесть при расчете влияние силы сдвига связующего слоя между листами материала. Сравнение расчетных данных с использоватериала.

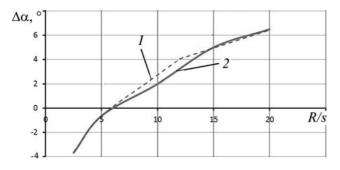


Рис. 6. Зависимости угла пружинения  $\Delta \alpha$  от относительного радиуса закругления  $R \, / \, s$  :

1 — расчет с коэффициентом k = 0,4; 2 — эксперимент

нием приведенной толщины в формулах (4) и (5) приведено на рис. 6. Для листа толщиной 2 мм при напряжении сдвига  $\tau = 0.35~{\rm H/mm}^2$  на контактной области между слоями соединенных металлических листов коэффициент k=0.4.

Заключение. Решение, предложенное в работе И.А. Норицына, Ю.Г. Калпина, оптимально подходит для определения угла пружинения многослойного материала, но требует введения дополнительных параметров. Коэффициент k позволит учесть при расчете влияние силы сдвига связующего слоя между листами материала. Если многослойные листы состоят из однородных металлических заготовок равной толщины, то можно экспериментально получить зависимость коэффициента k от силы сдвига.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю., Шпунькин Н.Ф. Краткий обзор многослойных листовых деформируемых материалов, используемых для защиты от шума // Известия МГТУ "МАМИ". 2012. № 2. Т. 2. С. 194–199.
- 2. **Калпин Ю.Г., Перфилов В.И., Петров П.А. и др.** Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2011. 244 с.
- 3. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семёнов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.
- Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю. Пружинение многослойных материалов // Известия МГТУ "МАМИ". 2013. Т. 2. № 2. С. 198—202.
- 5. Сапрыкин Б.Ю. Анализ способов расчета пружинения листовых материалов // Известия МГТУ "МАМИ". 2013. Т. 2.  $\mathbb{N}$  2. С. 133—139.

Сергей Александрович Типалин, канд. техн. наук, Tsa mami@mail.ru;

Борис Юрьевич Сапрыкин

УДК 621.762

**С.Е. Александров** (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва), **А.Р. Пирумов** (Московский государственный университет приборостроения и информатики)

# Общий подход к анализу процессов выдавливания и волочения в условиях плоской деформации методом верхней оценки\*

Предположено, что при выдавливании или волочении через достаточно длинную наклонную матрицу в условиях плоскодеформированного состояния окружная скорость равна нулю. На радиальную скорость не накладываются никакие ограничения, помимо требований теоремы о верхней оценке. Получено общее выражение для верхней оценки силы выдавливания и волочения. В случае применения закона максимального трения точное асимптотическое поведение действительного поля скорости вблизи поверхности трения учитывается в кинематически возможном поле скорости.

**Ключевые слова:** выдавливание; волочение; плоская деформация; верхняя оценка; общее решение; максимальное трение.

It is assumed that the circumferential velocity vanishes in extrusion or drawing through sufficiently long wedge – shaped die under plane strain conditions. No restriction other than those following from the upper bound theorem is imposed on the radial velocity. Under such assumptions, general expression for the upper bound on the extrusion and drawing pressure is obtained. In the case of the maximum friction law, the exact asymptotic behavior of the real velocity field near the friction surface is taken into account in the kinematically admissible velocity field.

Keywords: extrusion; drawing; plane strain conditions; upper bound; general solution; maximum friction.

Процессы выдавливания и волочения через достаточно длинную наклонную матрицу в условиях плоскодеформированного состояния теоретически исследованы во многих работах.

Эти процессы имеют существенное значение для исследования формирования тонкого слоя интенсивных пластических деформаций вблизи поверхности трения [1]. Такие слои часто возникают в окрестности поверхности трения в процессах обработки металлов давлением и в специальных экспериментах [2–5].

В данной статье развивается общий подход к построению кинематически возможного поля скорости, необходимого для построения решения методом верхней оценки. Аналогичный подход для осесимметричного выдавливания и волочения через коническую матрицу представлен в работе K. Osakada, Y. Niimi (A study on radial flow field for extrusion through conical dies // Int. J. Mech. Sci. 1975. V. 17. P. 241–254).

Особенностью конкретного численного решения является учет асимптотического сингулярного поведения действительного поля скорости вблизи поверхности максимального трения (поверхность, на которой удельные силы трения при проскальзывании равны пределу текучести при чистом сдвиге), установленного в [6], в кинематически возможном поле скорости.

Исследование [7], основанное на общем подходе работы К. Osakada, Y. Niimi, показало, что учет асим-

птотического сингулярного поведения поля скорости вблизи поверхности максимального трения повышает точность решения, даже если принятые удельные силы трения меньше предела текучести материала при чистом сдвиге.

При таком выборе кинематически возможного поля скорости решение позволяет оценить коэффициент интенсивности скорости деформации, введенный в [6]. Этот коэффициент входит в теории, развиваемые для прогнозирования толщины слоя интенсивных пластических деформаций вблизи поверхностей трения и эволюции свойств материала в этом слое [1].

Постановка задачи. Схема процесса показана на рис. 1. Начальная толщина полосы обозначена  $2\,H_0$ , а конечная  $-\,2\,H_1$ . Угол раствора матрицы равен  $2\,\alpha$ . Скорость жесткой зоны при входе в очаг деформации равна U, а при выходе из очага деформации U. При выдавливании U0 выдавливании U1 при волочении U3 при волочении U4 при волочении U6 при волочении U7 при выдавливании U8 при волочении U8 при волочении U9 при волочении U

Введем полярную систему координат  $(r, \theta)$ , начало которой находится на пересечении линий, являющихся продолжением плоских поверхностей матрицы. В начало этой системы координат поместим также начало декартовой системы координат (x, y). Ось x совместима с осью  $\theta = 0$ .

В полярной системе координат поверхности матрицы определяются уравнениями  $\theta=\pm\alpha$ . Поскольку процесс симметричен относительно оси  $\theta=0$ , то достаточно получить решение в области  $\theta\geq 0$ .

Принимаем, что материал является идеально жесткопластическим и подчиняется условию текучести

 $<sup>^*</sup>$  Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-12-01-92002-HHC а.

Мизеса. Предел текучести при одноосном растяжении обозначим  $\sigma_0$ , ненулевые компоненты тензора скорости деформации —  $\xi_{rr}$ ,  $\xi_{\theta\theta}$ ,  $\xi_{r\theta}$ .

Эквивалентная скорость деформации определяется как

$$\xi_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \xi_{rr}^2 + \xi_{\theta\theta}^2 + 2 \xi_{r\theta}^2 \right)^{1/2}. \tag{1}$$

Закон трения на поверхности  $\theta = \alpha$  имеет вид

$$\tau_f = \frac{m \,\sigma_0}{\sqrt{3}} \,, \tag{2}$$

где т $_f$  — удельные силы трения при проскальзывании;  $m \le 1$ .

При m=1 получаем закон максимального трения. Характерная особенность этого закона заключается в том, что материал не может поддерживать касательные напряжения, которые превышают величину  $\sigma_0 / \sqrt{3}$ .

Математическая особенность решений вблизи поверхности, на которой действует закон максимального трения, проявляется в том, что эквивалентная скорость деформации, определяемая по действительному полю скорости, подчиняется закону [6]

$$\xi_{e,q} = Ds^{-1/2} + o(s^{-1/2})$$
 при  $s \to 0$ , (3)

где s — расстояние до поверхности трения; D — коэффициент интенсивности скорости деформации; o — символ порядка (см. кн.: Найфе А.Х. Методы возмущений. М.: Мир, 1976. 454 с.). Окружная скорость должна обращаться в ноль на поверхности матрицы  $\theta$  =  $\alpha$ .

Кинематически возможное поле скорости. Предположим, что окружная скорость равна нулю. Тогда кинематическое краевое условие на поверхности  $\theta = \alpha$  автоматически выполняется. Уравнение несжимаемости в полярной системе координат принимает форму  $\partial u / \partial r + u / r = 0$ , где u — радиальная скорость.

Общее решение уравнения несжимаемости имеет вид

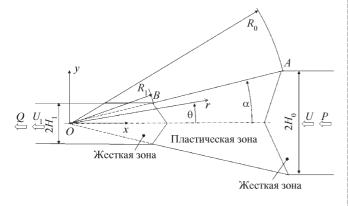


Рис. 1. Схема процесса

$$u = -U R_0 \frac{f(\theta)}{r}, \tag{4}$$

где  $f(\theta)$  — произвольная функция  $\theta$ ;  $R_0$  — радиальная координата точки A (см. рис. 1).

Компоненты тензора скорости деформации вычисляются из (4) как

$$\xi_{rr} = U R_0 \frac{f(\theta)}{r^2}; \xi_{\theta\theta} = -U R_0 \frac{f(\theta)}{r^2}; \xi_{r\theta} = \frac{U R_0}{2 r^2} \frac{df}{d\theta}.$$
 (5)

Подставляя (5) в (1), найдем

$$\xi_{eq} = \frac{UR_0}{\sqrt{3r^2}} \sqrt{4f^2 + \left(\frac{df}{d\theta}\right)^2} . \tag{6}$$

Чтобы поле скорости (4) было совместимо с движением жестких зон при входе в очаг деформации и выходе из очага деформации, необходимо ввести две линии разрыва скорости. Одна из этих линий должна проходить через точку A, другая — через точку B (см. рис. 1). Нормальная скорость на линиях разрыва должна быть непрерывна.

Введем единичные базисные векторы полярной системы координат, которые обозначим  $e_r$  и  $e_\theta$ , и единичные базисные векторы декартовой системы координат — i и j.

Рассмотрим произвольную линию разрыва скорости (рис. 2). Пусть n — единичная нормаль к линии разрыва в произвольной точке этой линии. Раскладывая вектор n по базису полярной системы координат, получаем

$$\mathbf{n} = -\sin \varphi \, \mathbf{e}_r + \cos \varphi \, \mathbf{e}_{\theta} \,\,, \tag{7}$$

где  $\phi$  — угол наклона касательной к линии разрыва к оси r.

Скорость каждой из жестких зон:

$$\boldsymbol{u}_{r} = -V \boldsymbol{i} , \qquad (8)$$

где V=U для жесткой зоны при входе в очаг деформации и  $V=U_1$  для жесткой зоны при выходе из очага деформации.

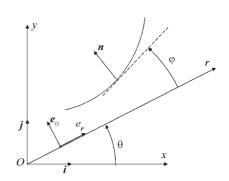


Рис. 2. Линия разрыва скорости

Без ограничения общности можно считать, что величина U задана. Так как материал несжимаемый, то

$$U_1 = \frac{U}{h}; \quad h = \frac{H_1}{H_0}.$$
 (9)

Орт i представляется в виде (см. рис. 2)

$$i = e_r \cos \theta - e_\theta \sin \theta$$
. (10)

Подставляя (10) в (8), получаем

$$u_r = -V(e_r \cos \theta - e_\theta \sin \theta). \tag{11}$$

Вектор скорости в пластической зоне имеет форму

$$\boldsymbol{u}_{p} = u \, \boldsymbol{e}_{r} \,. \tag{12}$$

Условие непрерывности нормальной скорости на поверхности разрыва скорости выражается уравнением

$$u_n \cdot n = u_r \cdot n. \tag{13}$$

Подставляя (4), (7), (11) и (12) в (13), найдем

$$t f(\theta) \sin \varphi = \rho (\sin \varphi \cos \theta + \sin \theta \cos \varphi),$$
 (14)

где t = U/V и  $\rho = r/R_0$ .

Из геометрических соображений (см. рис. 2):

$$tg \varphi = \frac{r d \varphi}{dr}.$$
 (15)

Подставляя (15) в (14), приходим к следующему дифференциальному уравнению для линии разрыва скорости

$$\frac{d\rho}{d\theta}\sin\theta + \rho\cos\theta = tf(\theta). \tag{16}$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$\rho = \rho_d(\theta) = \frac{1}{\sin \theta} \left( C + t \int_0^{\theta} f(z) dz \right), \tag{17}$$

где C — постоянная интегрирования; z — немая переменная. Необходимо, чтобы линия разрыва скорости пересекала ось  $\theta$  = 0, тогда функция  $\rho_d(\theta)$  должна стремиться к конечному пределу при  $\theta \to 0$ . Это возможно при C = 0.

Из уравнения (17):

$$\rho = \rho_d(\theta) = \frac{t}{\sin \theta} \int_0^{\theta} f(z) dz.$$
 (18)

Так как t = 1 на линии разрыва скорости у входа в очаг деформации и t = h на линии разрыва скорости у

выхода из очага деформации, то из (18) получим уравнения этих линий в форме:

$$\rho = \rho_{d0}(\theta) = \frac{1}{\sin \theta} \int_{0}^{\theta} f(z) dz;$$

$$\rho = \rho_{d1}(\theta) = \frac{h}{\sin \theta} \int_{0}^{\theta} f(z) dz$$
(19)

соответственно.

Линия  $\rho = \rho_{d0}(\theta)$  проходит через точку A, а линия  $\rho = \rho_{d1}(\theta)$  — через точку B (см. рис. 1). Поэтому  $\rho_{d0}(\alpha) = 1$  и  $\rho_{d1}(\alpha) = h$ . Подставляя эти условия в (19), получаем, что на функцию  $f(\theta)$  наложено ограничение

$$\sin \alpha = \int_{0}^{\alpha} f(z) dz.$$
 (20)

Принимая во внимание (11) и (12), величина скачка скорости на линии разрыва определяется как

$$[u] = [(u + V \cos \theta)^2 + V^2 \sin^2 \theta]^{1/2}.$$
 (21)

Подставляя (4) в (21) и учитывая, что  $\rho = \rho_d(\theta)$  на линии разрыва, найдем

$$[u] = \frac{U}{t\rho} [t^2 f^2(\theta) - 2tf(\theta) \rho_d(\theta) \cos\theta + \rho_d^2(\theta)]^{1/2}. (22)$$

Бесконечно малый элемент линии разрыва скорости представляется в виде

$$dL = R_0 \left[ \left( \frac{d\rho_d}{d\theta} \right)^2 + \rho_d^2(\theta) \right]^{1/2} d\theta.$$

Исключая в этом соотношении производную  $d\rho_d/d\theta$  с помощью (16), получаем

$$dL = \frac{R_0}{\sin \theta} \left[ t^2 f^2(\theta) - 2t f(\theta) \rho_d(\theta) \cos \theta + \rho_d^2(\theta) \right]^{1/2} d\theta,$$
(23)

где вместо  $\rho_d(\theta)$  следует подставить  $\rho_{d0}(\theta)$  или  $\rho_{d1}(\theta)$  в зависимости от линии разрыва скорости.

**Мощность внутренних сил.** Мощность внутренних сил за исключением мощности на линиях разрыва определяется как

$$W_{V} = \sigma_{0} \int_{0}^{\alpha} \int_{R_{0} \rho_{d1}(\theta)}^{R_{0} \rho_{d1}(\theta)} \xi_{eq} r dr d\theta.$$
 (24)

Подставляя (6) в (24), найдем

$$W_V = \frac{\sigma_0 U R_0}{\sqrt{3}} \int_0^{\alpha} \int_{\rho_{d1}(\theta)}^{\alpha \rho_{d0}(\theta)} \sqrt{4f^2 + \left(\frac{df}{d\theta}\right)^2} \rho^{-1} d\rho d\theta.$$
 (25)

Так как функция  $f(\theta)$  не зависит от  $\rho$ , то интегрирование по этой переменной и использование (19) дает

$$W_V = -\frac{\sigma_0 U R_0 \ln h}{\sqrt{3}} \int_0^\alpha \sqrt{4f^2 + \left(\frac{df}{d\theta}\right)^2 d\theta} . \quad (26)$$

Пластическая мощность на линиях разрыва скорости определяется с помощью (19), (22) и (23) как

$$W_{d} = \frac{\sigma_{0}}{\sqrt{3}} \int_{0}^{\alpha} [u] dL =$$

$$= \frac{\sigma_{0} U R_{0}}{\sqrt{3}} \int_{0}^{\alpha} \left[ \frac{f^{2}(\theta)}{F(\theta)} - 2 \cot \theta f(\theta) + \frac{F(\theta)}{\sin^{2} \theta} \right] d\theta,$$
(27)

где 
$$F(\theta) = \int_{0}^{\theta} f(z) dz$$
.

Из этого уравнения видно, что величина  $W_d$  принимает одно и то же значение на каждой линии разрыва скорости. Радиальная скорость на поверхности трения находится из (4) в виде  $u\big|_{\theta=\alpha}=-U\,R_0\,f(\alpha)r^{-1}$ . Тогда с учетом (2) пластическая мощность на поверхности трения

$$W_{f} = -\frac{m\sigma_{0}}{\sqrt{3}} \int_{R_{1}}^{R_{0}} u \Big|_{\theta=\alpha} dr = -\frac{m\sigma_{0} U R_{0} f(\alpha)}{\sqrt{3}} \ln h, \quad (28)$$

где использованы геометрические соотношения  $H_0 = R_0 \sin \alpha$  и  $H_1 = R_1 \sin \alpha$  (см. рис. 1).

Общая мощность внутренних сил определяется как

$$W_i = W_V + 2W_d + W_f . (29)$$

Решение. В соответствии с теоремой о верхней опенке

$$\frac{P_u U}{2B} = W_i \; ; \quad \frac{Q_u U_1}{2B} = W_i \; , \tag{30}$$

где B — ширина полосы;  $P_u$  — верхняя оценка силы P;  $Q_u$  — верхняя оценка силы Q.

Из (9) и (30) следует, что  $P_u h = Q_u$ . Поэтому далее определяли только величину  $P_u$ . Подставляя (26)—(28) в (29) и затем полученное выражение для  $W_i$  в (30), найдем

$$\frac{\sqrt{3} P_u}{2 \sigma_0 B H_0} = -\frac{\ln h}{\sin \alpha} \left[ mf(\alpha) + \int_0^\alpha \sqrt{4f^2 + \left(\frac{df}{d\theta}\right)^2} d\theta \right] + \frac{2}{\sin \alpha} \int_0^\alpha \left[ \frac{f^2(\theta)}{F(\theta)} - 2 \cot \theta f(\theta) + \frac{F(\theta)}{\sin^2 \theta} \right] d\theta.$$

Отсюда безразмерная сила  $p_u$  представляется в форме

$$p_{u} = \frac{\sqrt{3} P_{u}}{2 \sigma_{0} B H_{0}} = -G_{0}(\alpha) \ln h + G_{1}(\alpha), \qquad (31)$$

гле

$$G_{0}(\alpha) = \frac{1}{\sin \alpha} \left[ mf(\alpha) + \int_{0}^{\alpha} \sqrt{4f^{2} + \left(\frac{df}{d\theta}\right)^{2}} d\theta \right];$$

$$G_{1}(\alpha) = \frac{2}{\sin \alpha} \int_{0}^{\alpha} \left[ \frac{f^{2}(\theta)}{F(\theta)} - 2 \cot \theta f(\theta) + \frac{F(\theta)}{\sin^{2} \theta} \right] d\theta.$$
(32)

При выбранной функции  $f(\theta)$ , удовлетворяющей условию (20), величины  $G_0(\alpha)$  и  $G_1(\alpha)$  определяются из (32) численным интегрированием. Если выбранная функция  $f(\theta)$  содержит произвольные параметры, то правая сторона (31) зависит от этих параметров и для вычисления лучшей оценки силы выдавливания необходимо выполнить численную минимизацию правой стороны (31) по этим параметрам.

Если m=1 в (2), то желательно выбрать функцию  $f(\theta)$  так, чтобы выполнялось условие (3). Приведенное ниже решение получено именно для такого закона трения. Простейшая функция  $f(\theta)$ , позволяющая удовлетворить (3), имеет вид

$$f(\theta) = a + 2b\sqrt{\alpha^2 - \theta^2} , \qquad (33)$$

где a, b — произвольные параметры.

Помимо условия (3), функция  $f(\theta)$  в виде (33) позволяет удовлетворить условию, что радиальная скорость — четная функция  $\theta$ , которое следует из симметрии краевой задачи. Из (33) находим

$$f(\alpha) = a; \qquad (34)$$

$$F(\theta) = a\theta + b \left[ \theta \sqrt{\alpha^2 - \theta^2} + \alpha^2 \arctan\left(\frac{\theta}{\sqrt{\alpha^2 - \theta^2}}\right) \right]; \qquad (35)$$

$$\frac{df}{d\theta} = -\frac{2b\theta}{\sqrt{\alpha^2 - \theta^2}}. \qquad (36)$$

Подставляя (35) в (20), получаем

$$b = \frac{2(\sin\alpha - a\alpha)}{\pi\alpha^2}.$$
 (37)

Таким образом, после исключения b в (33), (35) и (36) с помощью (37) правая сторона (31) оказывается зависящей от одного произвольного параметра a. Численная минимизация позволяет найти  $p_u$  и a.

Зависимость  $p_u$  от h при нескольких значениях  $\alpha$  приведена на рис. 3. Сравнение этих значений  $p_u$  при  $\alpha = 15$  и  $30^{\circ}$  в интервалах  $0,4 \le h \le 0,7$  и  $0,2 \le h \le 0,7$  соответственно с решением [3], полученным численно с ис-

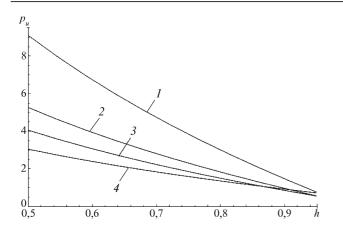


Рис. 3. Зависимость давления выдавливания  $p_u$  от h при различных углах наклона матрицы:

$$1 - 5^{\circ}$$
;  $2 - 10^{\circ}$ ;  $3 - 15^{\circ}$ ;  $4 - 30^{\circ}$ 

пользованием метода линий скольжения, показало, что различия практически нет. Это подтверждает высокую точность полученного приближенного решения.

Коэффициент интенсивности скорости деформации. Из (6) и (36) находим

$$\xi_{e\,q} \to \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{\alpha} U}{R_0 \rho^2} \left| \frac{b}{\sqrt{\alpha - \theta}} \right| \quad \text{при} \quad \theta \to \alpha \,.$$
 (38)

Сравнивая (3) и (38), получаем

$$D = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U\sqrt{\alpha} |b|}{\sqrt{R_0} \rho^{3/2}}.$$
 (39)

Так как величина a определяется при минимизации правой стороны (31), то величина b известна из (37). Тогда коэффициент интенсивности скорости деформации вычисляется из (39).

Для иллюстрации решения введем безразмерный коэффициент интенсивности скорости деформации

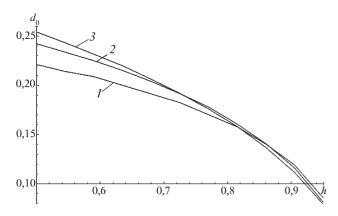


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $d_0$ , характеризующего коэффициент интенсивности скорости деформации, от h при различных углах наклона матрицы:

$$1-5^{\circ}$$
;  $2-10^{\circ}$ ;  $3-30^{\circ}$ 

соотношением  $d=DR_0^{1/2}U^{-1}$ . Зависимость d от  $\rho$  очевидна из (39) и может быть представлена в виде  $d=d_0\,\rho^{-3/2}$ . Поэтому на рис. 4 показано влияние h и  $\alpha$  на величину  $d_0$ . Кривая для  $\alpha=15^\circ$  практически совпадает с кривой для  $\alpha=30^\circ$ .

Заключение. Методом верхней оценки построено общее приближенное решение для процесса выдавливания и волочения через наклонную матрицу в условиях плоскодеформированного состояния. В вычислениях использовано кинематически возможное поле скорости, которое удовлетворяет точному асимптотическому сингулярному поведению действительного поля скорости вблизи поверхности трения. Сравнение с численным решением, полученным методом линий скольжения, показало высокую точность нового решения. Вычислен коэффициент интенсивности скорости деформации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Александров С.Е., Грабко Д.З., Шикимака О.А. К определению толщины слоя интенсивных деформаций в окрестности поверхности трения в процессах обработки металлов давлением // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 3. С. 72—78.
- 2. **Aukrust T., LaZghab S.** Thin shear boundary layers in flow of hot aluminium // Int. J. Plast. 2000. V. 16.  $\mathbb{N}_{2}$  1. P. 59–71.
- 3. **A new** approach for studying mechanical properties of thin surface layers affected by manufacturing processes / S.P. Moylan, S. Kompella, S. Chandrasekar, T.N. Farris // Trans. ASME. J. Manuf. Sci. Eng. 2003. V. 125. P. 310–315.
- 4. **Трунина Т.А., Коковихин Е.А.** Формирование мелкодисперсной структуры в поверхностных слоях стали при комбинированной обработке с применением гидропрессования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 2. С. 71–74.
- 5. **Толщина** слоя интенсивных пластических деформаций в окрестности поверхности трения при осадке цилиндра плоскими бойками / С.Е. Александров, Д. Вилотич, Е.А. Лямина, Л. Шиджанин // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 3. С. 190—195.
- 6. **Alexandrov S., Richmond O.** Singular plastic flow fields near surfaces of maximum friction stress // Int. J. Non-Linear Mech. 2001. V. 36. № 1. P. 1–11.
- 7. On the dead zone formation and limit analysis in axially symmetric extrusion / S. Alexandrov, G. Mishuris, W. Mishuris, R.E. Sliwa // Int. J. Mech. Sci. 2001. V. 43.  $\mathbb{N}_2$  2. P. 367–379.

Сергей Евгеньевич Александров, д-р техн. наук, sergei\_alexandrov@spartak.ru; Александр Ремальевич Пирумов, канд. техн. наук

УДК 621.73.043

Т.В. Бровман, М.Г. Васильев

(Тверской государственный технический университет)

# Способ вытяжки осесимметричных заготовок с их предварительной деформацией

Для повышения качества осесимметричных заготовок разработан способ вытяжки с предварительным выполнением углублений на листовой заготовке. Способ использован для изготовления корпусов масляных фильтров.

**Ключевые слова:** листовая штамповка; устойчивость процесса деформации; точность расчета; повышение качества осесимметричных заготовок.

The drawing with preformed recesses on the slab is developed for improvement of quality of axissymmetrical billets. Method used for producing of oil filters.

**Keywords:** sheet stamping; stability of deformation process; accuracy of calculation; increase of quality of axissymmetrical billets.

В настоящее время значительное количество изделий изготовляют способом вытяжки из тонколистовых заготовок по схеме, показанной на рис. 1.

Лист 1 толщиной h, вырезанный из листа в форме диска начальным радиусом  $R_0$ , располагают на плоскости матрицы 2 и деформируют пуансоном 3 в цилиндрическое изделие радиусом  $R_1$ .

Приближенно длина полученной цилиндрической заготовки  $l=R_0-R_1$  .

Этот процесс хорошо изучен и описан в ряде работ. Известно, что реализация такого процесса затрудняется образованием дефектов — складок, возникающих на заготовке за счет воздействия тангенциальных напряжений сжатия (рис. 2). Обычно складки образуются в виде 6...8 волн и их амплитуда может доходить до 15...20 мм. Это приводит к браку и затрудняет

По данным Л.А. Шофмана, существует ограничение:

изготовление заготовок большой длины.

$$\frac{R_0 - R_1}{h} \le 44$$

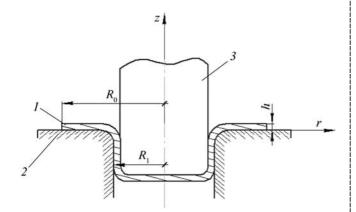


Рис. 1. Схема вытяжки цилиндрических заготовок без прижима

и нарушение этого неравенства приводит к потере устойчивости плоской формы заготовки и образованию волн.

Методы расчета напряжений в процессе вытяжки изложены в ряде работ (например, в [1]). И.В. Геккелер в 1934 г. впервые изучил процесс образования волн на плоском диске. Если для деформации тонких листов принять компоненты тензора напряжений (в условиях осесимметричной деформации)  $\tau_{r\,\theta} = \tau_{rz} = \tau_{\theta z} = \sigma_z = 0$ , то уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \qquad (1)$$

где  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  — радиальное и тангенциальное напряжение соответственно; расположение координатных осей показано на рис. 1.

При этом  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  — главные напряжения, и если использовать условие текучести Треска—Сен-Венана

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2k \,, \tag{2}$$

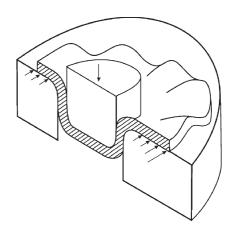


Рис. 2. Схема образования складок при вытяжке

где k — предел текучести при сдвиге,  $k=\frac{\sigma_{_{\rm T}}}{2}$ ;  $\sigma_{_{\rm T}}$  — предел текучести при растяжении—сжатии, то решая систему (1), (2) при краевом условии  $\sigma_{_{\rm T}}=0$  при  $r=R_0$ :

$$\sigma_{\theta} = 2k \left( \frac{\ln R_0}{r} - 1 \right). \tag{3}$$

Графики изменения напряжений в деформируемой заготовке при условии текучести Треска—Сен-Венана приведены на рис. 3, a. Величина  $\frac{R_0}{r}$  достигает максимального значения 2,78 при  $\sigma_r$  =2 k и  $\sigma_\theta$  =0 .

Если использовать условие текучести Мизеса

$$\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \sigma_\theta = 3k^2 \tag{4}$$

 $(\sigma_{\rm T} = k\sqrt{3})$ , то, определив отсюда

$$\sigma_{\theta} = 0.5 \left( \sigma_r - \sqrt{3} \sqrt{4k^2 - \sigma_r^2} \right)$$

и подставив в (1), после интегрирования получим

$$\frac{\ln R_0}{r} = \frac{\sqrt{3}}{2} \arcsin\left(\frac{\sigma_r}{2k}\right) + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sigma_r + \sqrt{3}\sqrt{4k^2 - \sigma_r^2}}{2k\sqrt{3}} \right|. (5)$$

График изменения напряжений для этого случая показан на рис. 3,  $\delta$ .

Напряжения для обоих условий текучести близки— на поверхности  $r=R_0$ ,  $\sigma_r=0$ , а напряжение  $\sigma_\theta$ —сжимающее и равно величине  $\sigma_{\scriptscriptstyle T}$  (по модулю). При этом  $\sigma_{\scriptscriptstyle T}=2\,k$ —при условии Треска—Сен-Венана и  $\sigma_{\scriptscriptstyle T}=k\,\sqrt{3}$  при условии Мизеса.

На поверхности  $r=R_{\rm l}$  ,  $\sigma_{\rm \theta}=0$  , а напряжение  $\sigma_r$  максимально:  $\frac{R_{\rm 0}}{R_{\rm l}}=2$  ,78 при условии Треска—Сен-Ве-

ниана и  $\frac{R_0}{R_1}$  =2 ,49 при условии Мизеса, т.е. оба условия

текучести дают близкие результаты. Именно напряжения сжатия  $\sigma_{\theta}$  приводят к потере устойчивости тонкого листа и возникновению крупных волн.

Известно, что для их предотвращения применяют вытяжку с прижимом. Специальная плита прижата к поверхности заготовки и удерживает ее от выпучивания. Но при этом увеличиваются силы трения, а следовательно, и напряжения  $\sigma_r$ . Это приводит к развитию кольцевых трещин, как показано на рис. 4, и к неисправимому браку.

Известны также способы с нагревом периферийных участков плоской заготовки, однако для тонких листов этот способ не эффективен: они быстро остывают и расход энергии обычно очень высокий (необходим подогрев в процессе деформации).

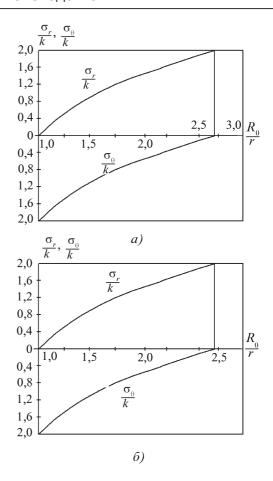


Рис. 3. Графики изменения напряжений в деформируемой заготовке при условии текучести Треска—Сен-Венана (a) и текучести Мизеса ( $\delta$ )

После проведения ряда экспериментов с деформацией заготовок в процессе высадки был разработан технологический процесс [2], в котором предусмотрена до начала вытяжки, или после частичной деформации вытяжки, дополнительная деформация с нанесением вдоль кольцевого пояса ряда углублений — до 16...24 шт., расположенных вдоль кольца по всей окружности.



Рис. 4. Заготовка с кольцевой трещиной

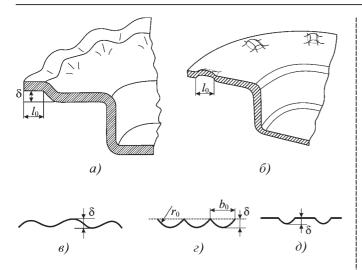


Рис. 5. Конфигурация заготовки после предварительной деформации

На рис. 5 представлена конфигурация заготовки после ее предварительной деформации. На рис. 5, a показан вариант способа с нанесением выступов на краю заготовки, т.е. именно там, где в обычном способе деформация сжатия максимальна. Но можно осуществлять деформацию и по схеме, приведенной на рис. 5,  $\delta$ , и даже с выдавливанием пояса углублений на цилиндрической части заготовок.

Различные варианты испытанных конфигураций углублений, нанесенных на лист до начала процесса вытяжки, показаны на рис. 5,  $\theta$ – $\theta$ .

Глубина  $\delta$  принята равной  $(0,5 \dots 1,0)h$ . Эти малые углубления остаются на заготовке (рис. 6). В случаях, когда это недопустимо, способ предварительной деформации использовать нельзя. Но во многих случаях такие углубления допустимы и не ухудшают качества изделий.

Между пуансоном и заготовкой следует предусматривать зазоры до 1,0 мм, чтобы избежать защемления пуансона. При изготовлении корпусов масляных фильтров были выполнены 18 углублений шириной 10...12 мм и глубиной 0,9...1,0 мм, что позволило изготовить более 10 тыс. изделий в ОАО "2462 ЦБПР" (г. Тверь) (см. рис. 6).

В процессе деформации жесткость листа, имеющего форму диска, в тангенциальном направлении зна-



Рис. 6. Углубления на цилиндрической части заготовки

чительно уменьшается в результате его предварительной деформации. Размер углублений в процессе деформации в основном уменьшается в радиальном направлении, т.е. уменьшается размер " $b_0$ " (см. рис. 5,  $\varepsilon$ ).

Однако если и происходит увеличение глубины  $\delta$  (см. рис. 5,  $\theta$ – $\theta$ ), например, от 0.5 до 0.8 мм, то это для данных изделий вполне допустимо и не ухудшает их качества.

Заключение. Предложен и реализован способ вытяжки, предусматривающий до начала деформации или после осуществления частичной деформации выполнение на заготовке углублений до 1 мм, расположенных по окружности и существенно уменьшающих жесткость заготовки.

При числе углублений 18...24 они предотвращают развитие складок значительной амплитуды, позволяют расширить диапазон размеров заготовок, значительно уменьшить их брак.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Бровман Т.В.** Определение усилий при листовой штамповке // Вестник машиностроения. 2004. № 3. С. 61–63.
- 2. Пат. 2491144 С2 РФ, МПК В 21 D 22/20. Способ изготовления полых цилиндрических заготовок / Т.В. Бровман, А.Б. Горященко, М.Г. Васильев, С.С. Ухабов; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24.

Татьяна Васильевна Бровман, канд. техн. наук, brovman@mail.ru;

Михаил Геннадьевич Васильев



## ПРОКАТНО-ВОЛОЧИЛЬНОЕ

# 6

## LIPONSBOTCIBO

УДК 621.771.01

**С.Б. Арюлин, И.В. Халипов** (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

## Определение величины и направления сил, действующих на рабочий валок маятниковой прокатной клети

Приведена методика определения величины и направления сил, действующих на рабочий валок маятниковой прокатной клети, которая может быть использована в инженерных расчетах при конструировании маятниковых станов и разработке рациональных режимов деформирования металла с учетом прочности деталей и механизмов рабочей клети.

**Ключевые слова:** маятниковая прокатка; рабочий валок; очаг деформации; равнодействующая полного давления; направление и величина сил.

The technique of determining the magnitude and direction of forces acting on the work roll of pendulum rolling mills is presented. The technique can be used in engineering calculations in the design of pendulum rolling mills and in choice of rational modes of deformation of the metall taking into account the strength of details and machinery of the rolling mill.

**Keywords:** pendulum rolling; working roll of mill; zone of deformation; resultant force of total pressure; direction and magnitude of forces.

При расчете энергосиловых параметров процесса периодической прокатки помимо одного из главных этапов — определения силы прокатки, переменной по углу пробега рабочим валком зоны обжатия металла и ее горизонтальной и радиальной составляющей, необходимой задачей также является определение величины и направления равнодействующей силы со стороны металла на рабочий валок в мгновенном очаге деформации.

Решение этой задачи позволяет с достаточной точностью определять нагрузки на детали и узлы прокатного стана, назначать рациональные режимы деформации металла с учетом прочности наиболее нагруженных механизмов рабочей клети, что включает подобного рода расчеты в перечень обязательных при конструировании станов периодической прокатки.

Так, например, при конструировании и исследовании планетарных станов различных конструкций этому вопросу уделено особое внимание, была разработана методика расчетов.

В данной статье приведено решение задачи по определению величины и направления сил, действующих на рабочий валок применительно к полосовой маятниковой прокатке, являющейся разновидностью периодической прокатки. Необходимость решения такой задачи возникла (как это было при исследовании планетарных станов) в связи с проведением кон-

структорских и исследовательских работ по созданию маятникового прокатного стана.

Некоторые материалы по разработке конструкции таких станов и исследованию процесса маятниковой прокатки приведены в ряде статей и авторских свидетельствах (например [1]), вместе с тем для понимания схем и выкладок, приведенных в статье, рассмотрим конструкцию маятникового прокатного стана и принцип его работы.

Маятниковый прокатный стан включает в себя задающую и маятниковую клети, объединенные в одной комбинированной станине, привод задающей и маятниковой клети (рис. 1).

Задающая клеть маятникового стана сообщает слитку предварительное обжатие и при этом обеспечивает необходимую подачу в зону деформации маятниковой клети, а также удерживает заготовку от произвольного перемещения в процессе обжатия рабочими валками.

Маятниковая клеть стана содержит станину 1, в проемах которой размещены валы опорных профилированных валков 2 с подушками. На концах валов свободно с помощью втулок 3 и гаек 4 закреплены маятники 5, соединенные с корпусами 6 рабочих валков 7. Рабочие валки с корпусами имеют механизмы уравновешивания 8, размещенные в маятниках.

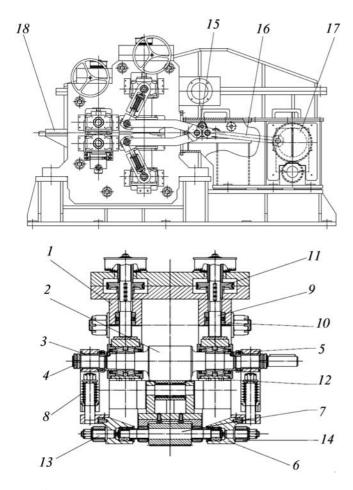


Рис. 1. Маятниковый прокатный стан с опорной профилированной планкой и разрез по маятниковой клети стана (верхняя половина)

В направляющих станины размещены подвижные траверсы с механизмами их уравновешивания. На траверсах смонтированы с одной стороны на осях нажимные втулки, с другой — сменные профилированные планки. С помощью механизмов уравновешивания рабочие валки через опорные втулки, установленные на их шейках на подшипниках, постоянно поджаты к профилированным планкам, а нажимные втулки к опорным профилированным кулачкам.

Клеть имеет механизмы установки рабочих валков обычной конструкции, состоящие из нажимных винтов 9, гаек 10, закрепленных в станине, и червячных редукторов 11. Синхронность перемещения нажимных винтов достигается посредством жесткой муфты, связывающей червячные редукторы.

Уравновешивание рабочих валков, маятников, подушек с опорными профилированными валками обеспечивается гидроцилиндрами 12. Корпуса рабочих валков связаны с помощью пальцев 13 с тягами 14 механизма привода клети, который включает в себя тележки 15 и кривошипно-шатунные механизмы 16, связанные с приводом маятников 17. Для направле-

ния прокатываемого металла в зону деформации предусмотрены направляющие линейки *18*.

Конструктивной особенностью маятниковой клети является наличие сменной профилированной планки, имеющей два участка профиля: криволинейный, например, в виде дуги окружности, задающей благодаря кинематике клети закон обжатия металла и прямолинейный, предназначенный для калибровки прокатываемой полосы.

Необходимость калибрующего участка обусловлена тем, что при периодической прокатке в конце зоны обжатия при отрыве рабочего валка от полосы на ней остается небольшая волна металла, повторяющаяся после каждого цикла деформации, в результате чего прокатанная полоса имеет рифленую поверхность.

В маятниковой клети рассматриваемой конструкции рабочий валок после обжимного участка движется до отрыва от прокатываемой полосы параллельно оси прокатки некоторое расстояние до полного исчезновения волны на металле. Разработана методика расчета необходимой длины калибрующего участка [2].

Прокатываемая заготовка, получившая первоначальное обжатие в задающей клети, подается по направляющим линейкам в маятниковую клеть. В процессе прокатки маятники с рабочими валками совершают колебательные движения относительно неподвижных центров качания.

При прямом (рабочем) ходе маятников рабочие валки обжимают заготовку по закону, задаваемому опорными профилированными планками, остающимися неподвижными от начала рабочего хода до окончания калибрующего участка, благодаря форме части профиля опорных валков, валы которых поворачиваются синхронно с валами привода маятников, благодаря кинематической связи, обеспечиваемой раздаточным редуктором.

При обратном (холостом) ходе маятников благодаря форме другой части профиля опорных профилированных валков подвижные траверсы с профилированными планками перемещаются в стороны от оси прокатки на расстояние, необходимое для того, чтобы рабочие валки, движущиеся против хода прокатки, не касались подаваемого в зону деформации металла.

Поскольку рабочие валки контактируют с профилированными планками через нажимные втулки, установленные на подшипниках, шейках валков, то при прямом и обратном ходе маятников валки вращаются в одном направлении, что снижает динамические нагрузки на них в момент касания металла и благоприятно сказывается на качестве проката.

Рассмотрим в плане рабочий валок в зоне обжатия маятниковой клети (рис. 2). Местонахождение рабочего валка в зоне обжатия определяется угловым положением маятника относительно вертикальной оси  $\phi_{\rm M}$  с одной стороны, а с другой — положением опорной профилированной планки с радиусом профиля  $R_{\rm пл}$  в направлении этой оси.

Передняя граница мгновенного очага деформации — t. b определяется точкой пересечения нормали k конту-

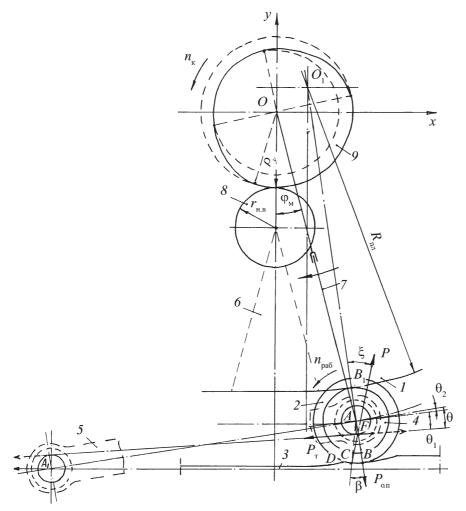


Рис. 2. Схема, поясняющая кинематику маятниковой прокатной клети: 1- профилированная планка; 2- рабочий валок; 3- металл; 4- опорная втулка; 5- тяга; 6- подвижная траверса; 7- маятник; 8- нажимная втулка; 9- опорный валок

ру зоны обжатия (проходящей через центр рабочего валка) с самим контуром зоны обжатия. Задняя граница мгновенного очага деформации — т. D определяется подачей и смещением исходного контура при прохождении рабочим валком зоны обжатия.

Так как кинематика клети подразумевает неподвижность опорной профилированной планки в момент прохождения рабочим валком зоны обжатия (профиль опорного валка на этом участке имеет постоянный радиус кривизны  $\rho_y$  =const), то нормаль к наружному контуру зоны обжатия совпадает с линией, соединяющей центр рабочего валка с геометрическим центром опорной профилированной планки  $O_1$  (известен из кинематики стана).

Угол  $\beta$  определяет точку приложения равнодействующей полного давления металла на валок (по условию задачи является известной величиной, так как согласно [2]:

$$\beta \approx 2 \frac{r_{\rm B}}{l_{\rm K}}$$

где  $r_{\rm B}$  — радиус рабочего валка;  $l_{\rm K}$  — мгновенная длина дуги контакта).

Со стороны опорной планки на рабочий валок действует сила  $P_{\rm o.n.}$ , направленная по линии, соединяющей центр рабочего валка и геометрический центр профилированной планки, которая приложена в т.  $B_1$  (точке, принадлежащей линии касания опорной втулки и профилированной планки). Эта сила приложена к шейке рабочего валка, действуя на нее через опорную втулку, но в данном случае это принципиального значения не имеет.

Для определения направления силы, действующей на рабочий валок от тяги механизма привода качания маятников, рассмотрим условие равновесия тяги, из которого следует, что от тяги на рабочий валок действует сила  $P_{\rm T}$ , направленная под углом  $\theta_1$  к линии, соединяющей центры расточек проушин тяги. Угол  $\theta_1$  определяют по формуле:

$$\theta_1 = \arcsin \frac{\rho_{II,T} + \rho_{II,K}}{I}, \qquad (1)$$

где  $\rho_{\text{ц.т}}$ ,  $\rho_{\text{ц.к}}$  — радиус круга трения в цапфе тяги со стороны ее крепления к подвижной тележке и к корпусу рабочего валка соответственю; l — расстояние между центрами расточек проушин тяги,

$$\rho_{_{_{_{_{\!\!1\!,\!\!1\!,\!\!1\!}}}}} = f_{_{_{_{\!1\!,\!1\!,\!\!1\!}}}} \frac{d_{_{_{_{\!1\!,\!1\!,\!\!1\!,\!\!1\!}}}}}{2}; \quad \rho_{_{_{1\!1\!,\!1\!,\!\!K}}} = f_{_{1\!1\!,\!1\!,\!K}} \frac{d_{_{1\!1\!,\!K}}}{2},$$

где  $f_{\text{ц,т}}, f_{\text{ц,к}}$  — приведенные коэффициенты трения в подшипниках цапф;  $d_{\text{ц,т}}, d_{\text{ц,к}}$  — внутренние диаметры подшипников соответствующих цапф.

Зная из кинематики клети угол  $\theta_2$ , между прямой, перпендикулярной линии  $O_1A$ , соединяющей центр рабочего валка и геометрический центр профилированной планки, и линией, соединяющей центры расточек проушин тяги  $A_1A$ , можно определить угол  $\theta$  между линией действия силы тяги на рабочий валок и прямой, перпендикулярной линии, соединяющей центр рабочего валка и геометрический центр профилированной планки:

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 = \arcsin \frac{\rho_{\text{u.t}} + \rho_{\text{u.k}}}{l} - \theta_2.$$
 (2)

Таким образом, известны направления и точки приложения сил, действующих от тяги  $P_{\scriptscriptstyle \rm T}$  и опорной планки  $P_{\scriptscriptstyle \rm O,\Pi}$  на рабочий валок. Так как рабочий валок

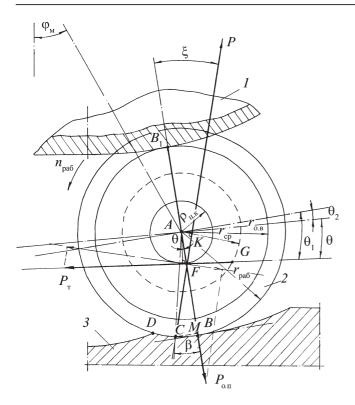


Рис. 3. К определению величины и направления сил, действующих на рабочий валок при прокатке:

1 — профилированная планка; 2 — рабочий валок; 3 — металл

является холостым, то при прохождении зоны обжатия внешние силы, действующие на него, должны замыкаться в одной точке (т. F). Учитывая, что точка приложения равнодействующей от металла на валок известна (т. C), то направление этой силы определено.

Из рис. З видно, что равнодействующая силы, действующей со стороны прокатываемого металла на валок, направлена под углом  $\xi$  к прямой, соединяющей центр рабочего валка и геометрический центр профилированной планки, т.е. к линии, по которой действует сила  $P_{0,\Pi}$ .

При определении угла  $\xi$  из треугольника *FMC* и треугольника *AMC* имеем:

$$CM = r_{\text{B}} \sin \beta;$$
  $AF = \frac{\rho_{\text{IL.K}}}{\cos \theta};$   $AM = r_{\text{B}} \cos \beta;$   
 $FM = AM - AF;$   $tg \xi = \frac{CM}{FM} = \frac{r_{\text{B}} \sin \beta}{r_{\text{B}} \cos \beta - \frac{\rho_{\text{IL.K}}}{\cos \theta}}.$  (3)

Поскольку мгновенная сила прокатки в каждый момент пробега рабочего валка зоны обжатия по условию задачи является известной величиной (находится при расчете энергосиловых параметров деформации полосового металла на маятниковых станах), то, зная направление равнодействующей, можно полностью

определить величину P равнодействующей сил, действующих со стороны металла на валок.

Определим силы, действующие на рабочий валок со стороны тяги  $P_{\rm T}$  и опорной планки  $P_{\rm o,n}$ . Так как рабочий валок холостой, то сумма моментов действующих сил относительно центра рабочего валка равна 0, т.е.

$$\Sigma M_A = 0$$
;  $\Sigma M_A = P_T \rho_{II,K} - P a = 0$ ,

где a = AK - плечо действия силы P. Из треугольника AFK:

$$AF = \frac{\rho_{\text{II.K}}}{\cos \theta}; \quad AK = AF \sin \xi; \quad AK = \frac{\rho_{\text{II.K}} \sin \xi}{\cos \theta};$$

$$P_{\text{T}} \rho_{\text{II.K}} - P \frac{\rho_{\text{II.K}} \sin \xi}{\cos \theta} = 0; \quad P_{\text{T}} = P \frac{\sin \xi}{\cos \theta}.$$
(4)

Для нахождения  $P_{\text{о.п}}$  спроектируем силы  $P_{\text{т}}$  и  $P_{\text{о.п}}$  на направление, перпендикулярное направлению действия силы P:

$$P_{\text{\tiny T}} \cos(\xi - \theta) - P_{\text{\tiny O,\Pi}} \sin \xi = 0 \; ; \; P_{\text{\tiny T}} = P_{\text{\tiny O,\Pi}} \; \frac{\sin \xi}{\cos(\xi - \theta)} \; . \; (5)$$

Подставляя (5) в (4), получаем

$$P_{\text{o.f.}} = P \frac{\cos(\xi - \theta)}{\cos \theta}.$$
 (6)

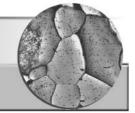
Таким образом, определены величины и направления действия на рабочий валок маятниковой клети всех сил. Предложенная методика расчета позволяет получить полную картину о характере их изменения по углу пробега рабочим валком зоны деформации, нагрузке на детали узла рабочего валка, узла опорной планки, деталей и механизмов привода качания маятников и может быть использована в инженерных расчетах.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Галкин М.П., Никитин Г.С., Арюлин С.Б.** Маятниковые прокатные станы // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 6. С. 30–32.
- 2. **Арюлин С.Б.** Определение длины калибрующего участка на стане периодического действия // Машиностроительные технологии: сб. тез. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 296 с.
- 3. **Теория** непрерывной продольной прокатки: учеб. пособие / Г.С. Никитин. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 399 с.

Сергей Борисович Арюлин, nukmt@bmstu.ru; Игорь Валентинович Халипов

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НОВЫЕ



## МАТЕРИАЛЫ

**А.А. Черепахин** (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

## К 75-летию

## кафедры "Технология конструкционных материалов" Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ)

Кафедра "Технология конструкционных материалов" ("ТКМ") под названием "Технология металлов" была основана в 1939 г. д-ром техн. наук, проф. К.Л. Шептуновым, который руководил ею до 1973 г. В 1973—1974 гг. кафедрой заведовал д-р техн. наук, проф. Г.М. Орлов, а в 1974—1992 гг. — д-р техн. наук, проф. В.А. Белов. С 1992 по 2008 г. кафедрой руководил д-р техн. наук, проф. В.Б. Арзамасов. С 2008 г. по настоящее время заведующим кафедрой является д-р техн. наук, проф. В.А. Кузнецов.

В 2011 г. под руководством зав. кафедрой, проф., д-ра техн. наук В.А. Кузнецова кафедра начала подготовку по направлению 222000.62 "Инноватика", профиль "Управление инновациями в наукоемких технологиях".

В состав кафедры входят четыре лаборатории: "Технология литейного производства", "Сварка", "Обработ-ка металлов давлением" и "Обработка материалов резанием"; два филиала (ОАО "ОК-ЛОЗА" и ОАО "ЦНИИТМАШ"); Научный образовательный центр и Студенческое инновационное бюро.

Преподаватели кафедры читают лекции и проводят лабораторные занятия для студентов всех форм обучения. Кроме учебной и учебно-методической работы выполняются и научно-исследовательские работы, результаты многих из них были внедрены в промышленность.

За время существования кафедры ее сотрудниками были защищены шесть докторских и 15 кандидатских диссертаций, опубликовано более 1000 научных трудов.

Преподаватели кафедры "Технология конструкционных материалов" ведут активную учебно-методическую и научную работу. Только за последние 10 лет преподавателями кафедры издано в центральных издательствах России 9 учебных пособий и 26 учебников для всех форм обучения (начальное, среднее и высшее профессиональное образование).

Кафедра "ТКМ" вела и ведет активную научно-исследовательскую работу, что позволяет совершенствовать существующие технологические процессы получения конструкционных материалов, расширить границы применения этих материалов в технике, добиться максимальной эффективности от их использования.

Основными научными направлениями на кафедре являются:

• совершенствование технологии получения отливок и сварных конструкций из сплавов алюминия;







К.Л. Шептунов

В.А. Белов

В.Б. Арзамасов

В.А. Кузнецов

- разработка составов коррозионно-стойких чугунов;
- разработка теории и практических приемов холодной штамповки;
- разработка и получение высокожаропрочных материалов для изделий различного назначения;
- исследование процессов поверхностно-пластического деформирования деталей машин;
- системный анализ процессов обработки резанием деталей машин;
- исследование процессов высокоскоростного протягивания наружных поверхностей;
- оптимизация типажа изделий и материальных запасов для нужд промышленности.

Тематика НИР, проводимых в настоящее время на кафедре:

под руководством проф. В.А. Кузнецова:

- теоретические основы управления качеством обработки за счет изменения способа установки инструмента;
- технологическое перевооружение, модернизация производственных процессов на российских предприятиях подшипниковой отрасли (в том числе в кооперации с иностранными компаниями) в целях повышения конкурентоспособности продукции на внешнем и внутреннем рынках;
- совместно с кафедрой "Автоматизированные станочные системы и инструменты" исследование и внедрение процесса деформирующе-режущего протягивания отверстий в деталях класса "зубчатые колеса":
- разработка и исследование новых методов комбинированной обработки и конструкций инструментов для их осуществления;
- исследование влияния новых технологических сред на качество обработки деталей машин резанием комбинированными методами;

под руководством проф. В.А. Кузнецова и проф. А.А. Черепахина:

- исследование обрабатываемости резанием новых марок стали;
- совместно с кафедрой "Технология машиностроения им. Ф.С. Демьянюка" исследование обработки сложнофасонных поверхностей высокоскоростным протягиванием;

под руководством проф. А.А. Черепахина и проф. В.М. Виноградова (кафедра "Технология машино-строения им. Ф.С. Демьянюка"):

- исследование процесса высокоскоростного протягивания наружных фасонных поверхностей;
- исследование процесса холодного прикатывания зубчатых венцов;

под руководством проф. В.Б. Арзамасова:

- теоретическое обоснование и разработка составов новых материалов различного назначения со специальными свойствами;
- разработка высокотемпературных материалов для электродов электронных устройств и плазматронов, а также для высоконагруженных электроконтактов различных систем транспорта;
- разработка и внедрение в производство новых высокотемпературных материалов для высоконагруженной электроконтактной аппаратуры; для электродов электронных устройств и плазматронов.

под руководством доц. В.С. Антипенко:

- оптимизация типажа изделий машиностроения;
- оптимизация типажа аккумуляторных батарей для объектов вооружений и спецтехники;
- оптимизация типажа систем электропуска для объектов вооружений и спецтехники;
- оптимизация уровня запаса запчастей для объектов вооружений и спецтехники;
- оценка влияния и разработка методов защиты экипажа от воздействия низкочастотных электромагнитных полей при движении транспортного средства.

Созданная 75 лет назад кафедра бережно хранит и развивает научные традиции, заложенные видными учеными, совершенствует процессы обучения молодых специалистов различных направлений подготовки Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ).

Александр Александрович Черепахин, канд. техн. наук, tkm1410@yandex.ru

УДК 620.22

А.В. Голобоков, Р.Б. Волков (ОАО "ОК-ЛОЗА", г. Сергиев-Посад Московской области), А.А. Черепахин, В.А. Кузнецов (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))

## Новая среднеуглеродистая сталь повышенного качества аля деталей подшипников качения

Приведены сравнительные характеристики по микроструктуре новой среднеуглеродистой стали марки 75ХГСФ и подшипниковой стали ШХ15. Рассмотрены основные параметры стали 75ХГСФ, выявлены ее преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** микроструктура; балл; твердость; термическая обработка; качество; включение; карбидная неоднородность.

Comparative characteristics of the microstructure of the new medium non-carbon steel 75 KhGSF and bearing steel ShKh15 are presented. The basic parameters of steel 75KhGSF are considered, it advantages and disadvantages are revealed.

Keywords: microstructure; point; hardness; heat treatment; quality; inclusion; carbide heterogeneity.

Основную массу подшипников качения изготовляют из стали ШХ15, которая благодаря уникальному сочетанию технологических и эксплуатационных свойств и относительной невысокой стоимости на протяжении более 100 лет остается основным материалом для производства подшипников. При этом ведущие иностранные фирмы в последние годы усовершенствовали методы получения металла и, вследствие этого, существенно повысили долговечность подшипников.

Однако современный уровень развития техники предъявляет к подшипникам качения все более жесткие требования по основным потребительским свойствам — грузоподъемности, долговечности, виброшумовым характеристикам. Поэтому, наряду с совершенствованием конструкции и технологии производства, продолжается поиск материалов, способных по своим свойствам конкурировать со сталью ШХ15.

В 1980-е гг. основные усилия исследований были направлены на разработку и внедрение оборудования и технологий, производящих сталь ШХ15 с помощью внепечного вакуумирования, применения синтетических шлаков, специальных методов переплава — электрошлакового и вакуумно-дугового, что обеспечило высокую чистоту металла по неметаллическим включениям и повышенную плотность.

Современные методы рафинирования стали ШХ15 позволили успешно избавиться от наиболее вредных неметаллических включений, таких как плохо деформируемые оксидные включения глобулярной формы. Разрабатывается и внедряется в производство сталь ШХ15-ШД, которая позволила увеличить ресурс работы подшипников в 2,5 раза по сравнению с аналогичными подшипниками, изготовленными из стали ШХ15, выплавленной в открытой электропечи.

Существуют значительные возможности повышения эксплуатационных свойств стали ШХ15 за счет улучшения ее микроструктурной однородности. Карбидная неоднородность стали ШХ15 характеризуется тремя пока-

зателями: структурной полосчатостью, остатками карбидной сетки и карбидной ликвацией, которые регламентируются шкалами 4, 5 и 6 ГОСТ 801—78.

Визуальная оценка структуры проводится в соответствии с ГОСТ 801–78 (рис. 1).

Структурная полосчатость влияет на механические, технологические и эксплуатационные свойства стали.

Карбидная сетка в структуре стали ШX15 приводит к трещинообразованию при закалке, снижает ударную вязкость и контактную выносливость.

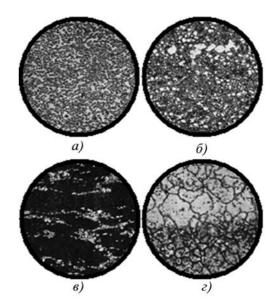


Рис. 1. Визуальная оценка структуры по ГОСТ 801—78: a — удовлетворительная микроструктура зернистого перлита со средней дисперсностью карбидов;  $\delta$  — неравномерно распределенные первичные карбиды и карбидная неоднородность в прутках;  $\epsilon$  — структурная полосчатость;  $\epsilon$  — разнозернистость

Марка стали	С	Mn	Si	Cr	ΣNi+Cu	S	Р
ШХ6	1,051,15			0,400,70			
ШХ9	1,001,10	0,200,40	0,170,37	0,901,20	≤ 0,50	≤ 0,020	≤ 0,027
ШХ15	0,951,05			1,301,65			

### 1. Химический состав подшипниковых сталей, %

#### 2. Химический состав конструкционных сталей, применяемых для изготовления железнодорожных рельсов, %

M	C	C:	M	C.	W	P	S	Прочие
Марка стали	C	51	Mn	Cr	V		не более	
75ХГСФ	0,740,82	0,400,80	0,751,05	0,400,60	0,050,12	0.025	0.025	0.025.41
75СГ	0,710,82	0,250,45	0,751,05	I	I	0,025	0,025	0,025 Al

Карбидная ликвация является хрупкой составляющей, снижает контактную выносливость, увеличивает коэффициент трения и износ. Указанные дефекты микроструктуры могут быть очагами выкрашивания на рабочих поверхностях.

Возникновение данных дефектов во многом определяется химическим составом стали, так как повышенное содержание углерода и хрома способствует интенсивному карбидообразованию и возникновению карбидной неоднородности.

Ранее предпринимались неоднократные попытки улучшить структурное состояние высокоуглеродистых хромистых сталей в результате корректировки их химического состава. Стали ШХ6 и ШХ9 (табл. 1) содержат пониженное количество хрома, однако содержание углерода оставалось высоким, получить требуемую структурную однородность не удалось.

В отечественной промышленности нашли широкое применение среднеуглеродистые низколегированные хромом, марганцем, кремнием и ванадием стали, позволяющие получать после упрочняющей термической обработки высокую твердость и обладающие высокой износостойкостью, сопротивлением знакопеременным нагрузкам. Из таких конструкционных сталей изготовляют железнодорожные рельсы (табл. 2) [1].

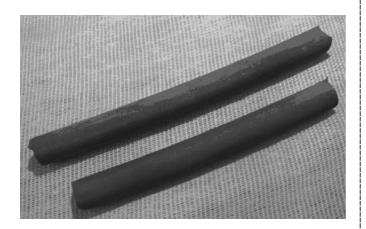


Рис. 2. Прутки новой среднеуглеродистой подшипниковой стали 75XГСФ после травления

После упрочняющей термической обработки (объемной закалки и отпуска) твердость рельсовой стали на глубине 5 мм достигала 42,5 HRC.

В 2009—2010 гг. ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина" и Череповецкий металлургический комбинат ОАО "Северсталь" разработали и изготовили опытную партию стали 75ХГСФ (ШХ7СГ), обладающей высокой степенью однородности микроструктурного состояния. Карбидная плотность, остатки карбидной сетки и ликвации ниже, чем у стали ШХ15 [2].

Подшипники, изготовленные из стали 75XГСФ, выдерживают пятикратный ресурс без разрушения.

В настоящей работе исследованы основные свойства опытной партии стали 75ХГСФ (рис. 2), поставленной ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина" и Череповецким металлургическим комбинатом ОАО "Северсталь", проведено сравнение этих характеристик с аналогичными свойствами стали ШХ15, а также изготовлены и испытаны подшипники из новой марки стали.

Опытная партия стали  $75X\Gamma\Phi$  состояла из горячекатаных прутков диаметром 40, 25 и 23 мм (рис. 2), химический состав которых приведен в табл. 3.

Химический состав стали прутков диаметром 40 и 23 мм соответствует заданному для стали марки 75ХГСФ. В прутках диаметром 25 мм зафиксировано пониженное содержание углерода.

Твердость и микроструктура высокоуглеродистых подшипниковых сталей регламентированы ГОСТ 801—78, что позволяет обеспечить хорошую обрабатываемость металлопродукции и получить оптимальный комплекс эксплуатационных свойств после упрочняющей термической обработки.

Фактические данные по микроструктуре и твердости прутков опытной партии приведены в табл. 4 и после дополнительного отжига отвечают требованиям ГОСТ 801-78.

Режим упрочняющей термической обработки образцов, деталей подшипников из стали марки 75ХГСФ разработан и осуществлен в соответствии с возможностью получения максимальной твердости и микроструктуры скрытомелкокристаллического мартенсита. Упрочняющая термическая обработка состояла из объемной закалки и отпуска.

## 3. Химический состав прутков опытной партии стали марки 75ХГСФ, %

Диаметр прутков, мм	С	Si	Mn	Cr	V	P	S	[0]
Заданный состав	0,750,80	0,500,70	1,101,30	0,450,80	0,070,15	≤ 0,025	≤ 0,020	0,0015
40	0,79	0,64	1,22	0,76	0,12	0,015	0,005	0,00160,0017
25	0,71	0,60	1,18	0,73	0,10	0,010	0,007	_
23	0,78	0,63	1,24	0,66	0,08	0,010	0,009	_

#### 4. Твердость и микроструктура прутков стали 75ХГСФ в состоянии поставки и после отжига

П	Твердость, НВ	Вид перлита	Твердость, НВ	Вид перлита	
Диаметр прутков, мм	в состояни	и поставки	после отжига		
40	331341		197201		
25	352375	Пластинчатый	201207	Зернистый	
23	311321		212217		

Закалку проводили в камерной печи, она включала в себя нагрев деталей в среде продуктов разложения метанола до температуры 840...845 °C, выдержку при этой температуре 40 мин и последующее охлаждение в масле МЗМ-16, нагретом до 45 °C.

Отпуск осуществляли в масляной ванне при температуре 155 °C в течение 3,5 ч.

Качество упрочняющей термической обработки удовлетворительное. Твердость деталей 63...64 HRC, микроструктура — мартенсит 1-го балла шкалы 3 ГОСТ 8233. Обезуглероженный слой отсутствовал. Трещин не обнаружено. Вид поверхности излома — равномерный, мелкозернистый, фарфоровидный, соответствует ГОСТ 801—78.

На закаленных и отпущенных образцах исследовали карбидную неоднородность стали 75ХГСФ, которую, как и для стали ШХ15, оценивали по трем показателям: структурной полосчатости, остаткам карбидной сетки и карбидной ликвации. Оценку проводили по шкалам ГОСТ 801—78: структурную полосчатость — по шкале 5 при увеличении 100 крат; карбид-

ную сетку — по шкале 4 при увеличении 500 крат. Карбидную ликвацию — по шкале 6 при увеличении 100 крат (табл. 5).

Распределение карбидной фазы в микроструктуре стали  $75 \text{X}\Gamma \text{C}\Phi$  равномерное, что положительно влияет на эксплуатационные свойства материала.

Оценка загрязненности металла неметаллическими включениями по ГОСТ 801—78 предусматривала сравнение наиболее загрязненного места микрошлифа с фотоэталонами. За критерий загрязненности принимали значения максимального балла (табл. 6).

Обнаружен повышенный уровень загрязненности оксидными включениями, причем оксиды значительно превышают норму по ГОСТ 801—78. В прутках диаметром 25 мм, кроме оксидов, зафиксирован выпад по глобулям до 3-го балла (см. табл. 6). Крупные оксидные глобулярные включения могут отрицательно повлиять на долговечность подшипников.

Исходя из результатов исследования качества опытного металла (см. табл. 3–6), из прутков диаметром 23 мм были изготовлены внутренние кольца; из

#### 5. Карбидная неоднородность стали 75ХГСФ

Показатель карбидной	Требования	Карбидная неоднородность, балл, при диаметре прутков, мм			
неоднородности	ГОСТ 801—78 для стали ШХ15	40	25	23	
Структурная полосчатость	3	12	12	1	
Карбидная сетка	3	0	0	0	
Карбидная ликвация	2	0,5	0,5	0	

## 6. Загрязненность стали 75ХГСФ неметаллическими включениями

Вид неметаллических	Требования	Неметаллические	включения, балл, при диа	аметре прутков, мм
включений	ГОСТ 801—78 для стали ШХ15	40	25	23
Оксиды	2,5	3,5	3,0	4,0
Сульфиды	2,5	2,0	2,0	1,0
Глобули	2,0	2,3	3,0	1,0

Нагрузка на пару подшипников, Н		Частота вращения,	Условия испытаний		Смазка	
радиальная	осевая	$MUH^{-1}$	Температура, °С	Время, ч	Марка, ОСТ	Масса, мг
500+10	485+10	18 000	Не более 120	210	ВНИИ НП-228Б, ОСТ 38.01438	240260

#### 7. Режимы испытаний подшипников

прутков диаметром 40 мм — наружные кольца подшипника 4-76102E3; из прутков диаметром 25 мм шарики. Заготовки получали разрезкой прутков на четыре части по длине с последующей обточкой.

Для испытаний подшипников применяли испытательные стенды ЛСП 74А. В качестве тестового подшипника выбран шпиндельный подшипник 2-76102E2, по габаритным размерам и размерам рабочей зоны соответствующий опытному подшипнику 4-76102E3. Подшипник 2-76102E2 изготовляли и на заводе из стали ШХ15-ШД.

В качестве аналога для выбора режима испытаний был принят подшипник 4-76102P по ТУ 5295 из стали 8Х4В9Ф2-Ш, работающий в тяжелых режимах эксплуатации и рассчитанный на длительный ресурс работы — более 60 000 ч. Техническими условиями предусмотрен режим ускоренных испытаний с увеличенными нагрузками и частотой вращения на расчетный ресурс 210 ч (коэффициент ускорения 285). Методика испытаний М 37.006.082. Расчет номинальной долговечности подшипников 4-76102P — 263,3 ч.

В процессе предварительных испытаний подшипников 2-76102E2 отработаны элементы испытательной камеры — изготовлены установочные стаканы и вал с размерами, соответствующими посадочным диаметрам подшипников. Проведены ревизия, текущий ремонт системы смазки узла нагружения подшипников испытательной нагрузкой с заменой подшипников системы нагружения.

Подшипники 2-76102E2 поставлены на предварительные испытания в режимах ТУ 5295 (табл. 7).

Тестовые подшипники отработали в стендах ЛСП 74A:

- 4 подшипника 420 ч;
- -2 подшипника -240 ч;
- один стенд отключен через 60 ч по причине дефектов стенда, приведших к повреждению подшипников. Данный стенд исключен из последующих испытаний до устранения дефектов.

Подшипники 4-76102E2 поставлены на испытания в два стенда ЛСП 74A (4 подшипника). Режим испытаний — в соответствии с табл. 7. Испытания проводили в круглосуточном режиме, без выключения испытательных стендов.

Подшипники 4-76102E3 в двух стендах ЛСП 74A отработали 210 ч. Состояние подшипников по результатам осмотра положительное, режимы испытаний и параметры работы стендов в пределах, заданных методикой испытаний.

После осмотра и проверки состояния смазки стенды включены для продолжения испытаний на фактический ресурс.

Опытная партия подшипников 4-76102ЕЗ в процессе изготовления потребовала решений вопросов оптимизации режимов обработки и подбора режущего инструмента. Обрабатываемость стали — удовлетворительная, но требует дальнейших уточнений: при точении — износ по главной задней поверхности резца, пришлифовании — засаливание и, как следствие, прижоги.

Проведены испытания подшипников 4-76102E2 и испытания подшипников-аналогов 2-76102E2.

Учитывая, что расчетная долговечность подшипников 4-76102E3 в режимах ТУ 5295 в 2 раза ниже, чем у подшипника 4-76102P, а также учитывая материал деталей подшипника 4-76102P — специальную жаропрочную сталь 8X4B9Ф2-Ш и нитроцементацию дорожек качения базового подшипника, можно говорить о пятикратном увеличении ресурса подшипника из стали 75XГСФ (4-76102E3) по сравнению с подшипниковыми сталями из стали ШХ15 по ГОСТ 801, так как он выдержал заданный ресурс ТУ 5295.

При осмотре рабочей зоны подшипников после отработки ресурса 210 ч на дорожке качения наружного кольца одного из подшипников обнаружены дефекты в виде тонких поперечных полос, что можно интерпретировать как проявившуюся неравномерность структуры металла, а именно — строчечные включения, отмеченные при входном контроле прутков металла диаметром 40 мм, изготовленных ОАО "Северсталь".

Несмотря на отмеченные дефекты, подшипник включен на продолжение испытаний. При аналогичном состоянии дорожек качения колец из стали ШХ15 подшипник выходит из строя в течение нескольких часов, т.е. сталь 75ХГСФ сохраняет работоспособность даже при наличии мелких дефектов поверхности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Колпишон Э.Ю.** Ключ к сталям: справочник. С.-Петербург: Профессия 2006—196 с
- 2. **Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З.** Сверхпластичность, изменение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М.: Наука, 2002. 438 с.

Александр Васильевич Голобоков, aleksandr17780@yandex.ru; Роман Борисович Волков; Александр Александрович Черепахин, канд. техн. наук; Владимир Анатольевич Кузнецов, д-р техн. наук

УДК 621.03+67.03

**Г.М. Волков** (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))

## Технологические процессы компактирования и консолидации наночастиц в объемный материал

Представлена классификация методов технологической переработки наночастиц в объемный материал. Рассмотрены особенности этих методов.

**Ключевые слова:** наночастицы; объемный наноматериал; объемный наноструктурированный материал; объемный материал с нанонаполнителем; объемный нанофрагментированный материал; компактирование; консолидация.

Classification of methods of technological processing of nanoparticles in the bulk material is presented. The features of these methods are considered.

**Keywords:** nanoparticles; bulk nanomaterial; bulk nanostructured material; bulk material with nanofillers; nanofragmented bulk material; compacting; consolidation.

Для создания машиностроительной продукции нового поколения необходимы конструкционные материалы с техническими характеристиками многократно выше существующего уровня. К ним относятся объемные наноматериалы, в свойствах которых реализован технический потенциал наноразмерного состояния вещества. Инженерные службы заготовительного и других производств машиностроительного комплекса должны быть информированы о техническом потенциале и технологических возможностях нового класса материалов.

Наноразмерными называют объекты, размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм. Наиболее массовым продуктом современной нанотехнологии являются нанопорошки [1]. Они состоят из дисперсных частиц размером до 100 нм, которые практически не связаны между собой. Технические приложения нанопорошков в настоящее время сосредоточены преимущественно в сфере электроники, а также в некоторых других областях науки и техники, где возможно практическое использование единичных наночастиц.

Применять дисперсные частицы наноразмерного диапазона в качестве конструкционного материала машиностроительного назначения невозможно, хотя производители нанопорошков предпочитают называть свою продукцию наноматериалом. Они могут служить только одним из сырьевых компонентов для последующего производства объемного материала, содержащего определенное количество наноразмерного наполнителя и пригодного для изготовления из него деталей машин, приборов и других технических устройств.

Дискретные наночастицы для создания возможности их практического использования в реальных конструкциях необходимо компактировать в объемный материал. Техно-

логия компактирования включает в себя большое количество операций, что резко увеличивает продолжительность и стоимость технологического цикла производства конечного продукта. Причем, наноразмеры добавок усложняют технологию и аппаратурное оформление технологических процессов компактирования по сравнению с традиционной технологией композиционных материалов.

Классификация технологических приемов оформления процессов получения наночастиц и последующего их компактирования или консолидации в объемный материал представлена на рис. 1.

Самые разнообразные вещества природного происхождения в газообразном, жидком или твердом состояниях служат исходным сырьем для производственных процессов получения всех традиционных материалов.

Дальнейшее развитие техники предъявляет к материалам повышенные требования, которым традиционные материалы во многих случаях не соответству-

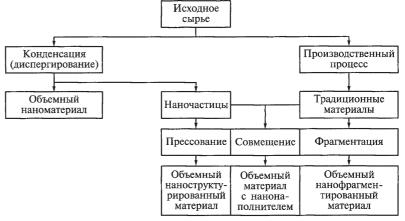


Рис. 1. Классификация процессов компактирования и консолидации наночастиц в объемный материал

ют, а потенциальные возможности традиционных производственных технологий для улучшения потребительских свойств выпускаемых материалов ограничены. Дополнение традиционной технологии потенциальными возможностями наноразмерного состояния вещества позволяет многократно превысить достигнутый уровень их потребительских свойств.

Исходное сырье, из которого посредством различных производственных процессов получают все традиционные материалы, может быть использовано также и для нанотехнологической переработки.

Например, сырьем для производства углеродных наночастиц (фуллерены, углеродные нанотрубки и их производные) служат углеродсодержащие химические соединения и вещества в газообразном, жидком или твердом состояниях. В настоящее время номенклатура химического состава наночастиц существенно расширилась и можно полагать, что исходным сырьем для получения дисперсных частиц наноразмерного диапазона могут служить самые разнообразные вещества.

Конечным целевым продуктом нанотехнологии, как показано на рис. 1, являются пять видов нанопродукции: наночастицы, объемный наноматериал, объемный наноструктурированный материал, объемный материал с нанонаполнителем и объемный нанофрагментированный материал.

Наночастицы. Наиболее очевидным способом получения наночастиц представляется измельчение вещества. Однако получение наночастиц диспергационным способом считают проблематичным, хотя в присутствии поверхностно-активных веществ удается получать дисперсные частицы нанометрового диапазона размеров. Тем не менее в нанотехнологии данный способ практически не используют.

По конденсационному способу наноразмерные частицы формируются путем атомарной сборки наночастиц или структурных элементов объемного материала из фрагментов продуктов физических процессов или химических реакций, осуществляемых в газовой, жидкой или твердой среде. Для инициирования химических реакций или физических процессов применяют различные способы воздействия на реакционную среду — термическое, электронно-лучевое, лазерное, магнетронное и др.

Технологический процесс получения наночастиц достаточно сложен в аппаратурном оформлении. Кроме того, получаемые наночастицы в большинстве случаев загрязнены примесями или иного химического состава, например, катализатором процесса, или другой аллотропной модификацией и переходными формами того же вещества, например, графитом или сажей при получении фуллеренов и углеродных нанотрубок. Отделение наночастиц от примесей представляет собой достаточно длительный и не менее сложный, чем получение наночастиц, процесс.

Синтезируемые наночастицы могут иметь специфическую кристаллическую структуру. Открытие

фуллеренов значительно обогатило арсенал нанообъектов. Дальнейшие исследования показали, что атомы углерода могут образовывать не только замкнутые сферы. Макромолекулы углеродного полимера могут формироваться в виде эллипсов, могут составлять многослойные сферы и эллипсы, которые называют луковичными структурами.

Углеродные атомарные сетки с шестиугольными ячейками могут сворачиваться в трубки, которые называют углеродными нанотрубками. Они могут быть открытыми или закрытыми с одного или обоих концов сетчатыми полусферами из атомов углерода. Углеродные нанотрубки могут быть одностенными, а могут и содержать внутри аналогичные углеродные образования меньших размеров с образованием двустенных и многослойных структур.

Все многообразие форм объемных макромолекул углерода называют нанообъектами семейства фуллеренов. Размер фуллерена С60 составляет около 1 нм. Однослойные углеродные нанотрубки имеют диаметр от 1 до 10 нм, а длину до 1000 нм. Диаметр многослойных нанотрубок может достигать 1 мкм, а длина доходит до 0,1 мм.

Объемный наноструктурированный материал. Основные технологические операции нанотехнологии по компактированию порошкообразного полуфабриката фактически повторяют аналогичные переделы производства композиционных материалов традиционной технологии. Для компактирования дисперсных частиц в объемный материал используют методы порошковой металлургии.

Однако наноразмеры порошка многократно усложняют аппаратурное оформление технологических процессов, которые требуют высококвалифицированного обслуживания сложного технологического оборудования и нового, более высокого уровня культуры производства. Это относится к процессам получения наночастиц и к их последующему компактированию в объемный наноструктурированный материал.

Характерной особенностью прессованного нанопорошка является высокая остаточная пористость, которая обусловлена большими потерями силы прессования на преодоление трения между наноразмерными частицами.

Пористость может быть уменьшена приложением высокого статического или динамического давления. Для этого применяют различные способы: холодное статическое прессование с односторонним или двусторонним приложением давления, вакуумное компактирование, горячее аксиальное прессование, холодное или горячее изостатическое прессование в гидро- или газостатах, литье из коллоидных гелей с последующим спеканием, магнитно-импульсное, ударное, взрывное и ультразвуковое прессование.

Максимальную плотность формовок получают при всестороннем сжатии нанопорошка в эластичной или деформируемой оболочке. Эта технология получила название изостатического прессования. При исполь-

зовании резиновых или других эластичных оболочек давление создают жидкостью (масло, вода, глицерин и др.) под высоким давлением до 1200 МПа, которую нагнетают в рабочую камеру гидростата.

Для деформируемых оболочек из алюминия или пластичных сталей применяют газостат, в рабочей камере которого создают газовое давление до 300 МПа. Упрощенным вариантом гидростатического прессования является квазигидростатическое прессование. Порошок в эластичной оболочке подвергают одностороннему или двустороннему приложению давления на обычном прессовом оборудовании.

Основная сложность технологических операций компактирования нанопорошков заключается в необходимости сохранить фазовые границы раздела наночастиц, не допуская их исчезновения, что привело бы к превращению наноматериала в композиционный материал традиционной технологии с микроскопической структурой и соответствующими свойствами.

Спекание формовок из нанопорошка ограничено невозможностью использовать высокие температуры. Повышение температуры спекания способствует уменьшению пористости, но с другой стороны, приводит к росту зерна, что означает нарушение фазовых границ раздела наночастиц с соответствующей ликвидацией преимуществ наноразмерного состояния вещества.

Некоторые технологические приемы позволяют получать изделия с низкой пористостью при пониженных температурах спекания: высокоскоростной микроволновой нагрев, ступенчатое спекание, плазмохимическое спекание, спекание в вакууме или в восстановительных средах, что, однако, резко усложняет и удорожает аппаратурное оформление процесса.

Совмещение процессов формования и спекания или проведение спекания под давлением позволяет достигать больших значений плотности, в том числе и близких к теоретическому значению при использовании меньших температур нагрева. Наиболее простой способ — спекание при одноосном приложении давления (рис. 2).

Более прогрессивным методом совмещения процессов формовки и спекания является горячее изостатическое прессование при давлениях до 300 МПа и температурах до 2000 °С. По упрощенному варианту данного метода нагреваемая толстостенная цилиндрическая пресс-форма после заполнения шихтой подвергается одноосному сжатию высоким давлением до 900 МПа. Это позволяет проводить компактирование нанопорошков при кратковременном температурном воздействии и достаточно больших температурах, не нарушая фазовых границ наночастиц.

Хороших результатов достигают при дополнительном наложении на процесс прессования ультразвукового поля. Работы в данном направлении под руководством проф. О.Л. Хасанова доведены до стадии опытно-промышленного производства объемной нанокерамики конструкционного и функционально-

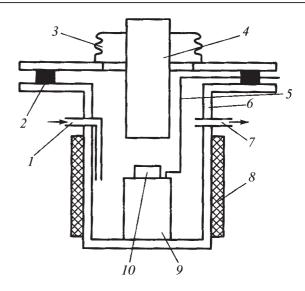


Рис. 2. Принципиальная схема установки для спекания под лавлением:

1, 7 — вход и выход газа соответственно; 2 — уплотнение; 3 — сильфон; 4 — пуансон; 5 — термопара; 8 — нагревательный элемент; 9 — наковальня; 10 — образец

го назначения из нанопорошков различного химического состава [2].

Принципиальным недостатком принятой всеми мировыми производителями технологии промышленного производства объемных наноструктурированных материалов является разделение в пространстве и во времени технологических процессов получения наночастиц и их компактирования. Они часто выполняются разными предприятиями, что дополнительно усложняет организацию производства. Все это резко удорожает материал.

**Объемный наноматериал.** Более перспективна моностадийная технология производства объемных наноматериалов, принципиальная возможность которой показана на примере модельной системы углерод—углерод [3].

По предлагаемой технологии наноразмерный наполнитель формируется одновременно с матрицей в одном и том же химическом реакторе, т.е. технология является моностадийной: в реактор поступает сырье, а из реактора выходит конечный продукт — объемный наноматериал. Этим предлагаемая технология принципиально отличается от традиционно многостадийной технологии компактирования наноразмерного наполнителя, она позволяет практически при тех же экономических затратах получать объемный наноматериал вместо нанопорошка.

Углеродный наноматериал обладает уникальными свойствами, многократно превышающими достигнутый уровень свойств углеродных конструкционных материалов традиционной технологии: по прочностным показателям — в 3 раза, по коэффициенту трения — в 5 раз, по коэффициенту катодного распыления — в

15 раз, по окислительной стойкости — до 300 раз. Кроме того, он химически и биологически инертен, непроницаем для жидкости и газа, радиационно-стоек, а по высокотемпературной удельной прочности превосходит вольфрам.

Технологический процесс отработан на пластинах, трубах и натурных изделиях в производственных условиях. Уникальные свойства объемного наноматериала системы углерод—углерод, подкрепленные возможностью получения крупногабаритных заготовок деталей в промышленных масштабах, создали предпосылки для разработки и изготовления изделий современного машиностроения, не имеющих аналогов в мировой практике.

Теоретические основы моностадийной технологии объемных наноматериалов, реализованные на модельной системе углерод—углерод, представляют практический интерес для создания широкой гаммы принципиально нового класса объемных наноматериалов со свойствами выше мирового уровня из исходного сырья любого другого химического состава.

Объемный материал с нанонаполнителем. Повышенный интерес к исследованиям в области модифицирования традиционных материалов добавками наночастиц вызван тем, что наноразмерный наполнитель вводится в технически значимые материалы промышленного производства, не нарушая устоявшийся технологический процесс изготовления этих материалов. Дополнительным стимулом к дальнейшему развитию исследований по модифицированию промышленных материалов традиционной технологии наночастицами является возможность получения максимального положительного эффекта при введении нанодобавок в сверхмалых количествах.

Для создания возможности практического использования преимуществ наноразмерного состояния вещества в реальных конструкциях дискретные наночастицы, независимо от их геометрической формы и метода получения, вводят в матрицу. В качестве матрицы применяют промышленные материалы традиционной технологии. Для совмещения наполнителя с матрицей используют также хорошо отработанную в процессе многолетней производственной практики технологию композиционных материалов.

Все методы синтеза наноразмерного наполнителя приводят к его получению в неравновесном метаста-бильном состоянии. Свободная энергия ненасыщенных связей периферийных атомов наночастиц реализуется в их избыточной энергии, что обусловливает высокую химическую активность наночастиц. Это создает значительные трудности в осуществлении технологического процесса введения и равномерного распределения химически активного наполнителя в матрице композиционного материала.

Основное направление реализации преимуществ нанотехнологии путем введения наночастиц в конструкционные материалы связано с повышением их удельной прочности. Низкое значение удельной проч-

ности является существенным ограничением технического применения современных конструкционных материалов. Нанотехнология позволяет резко поднять удельную прочность материалов.

Традиционная методика улучшения технологических свойств полимеров основана на введении в них пигментов, ингибиторов, пластификаторов и других компонентов. Для повышения конструкционных свойств полимеров их модифицируют преимущественно наночастицами металлов.

Полимеры, модифицированные малыми добавками наночастиц, по прочности и жесткости приближаются к металлическим материалам, но значительно легче их. Повышенная удельная прочность полимерных нанокомпозитов делает их особенно привлекательными для транспортного машиностроения, а с учетом их потенциальной дешевизны и для его наиболее массовой отрасли — автомобилестроения.

Кроме того, производство полимеров более технологично, существенно упрощается технологическая операция введения наночастиц в полимерную матрицу, детали из нанополимеров могут быть получены технологическими приемами массового производства, такими как экструзия, прессование, литье.

Наномодифицирование полимерного связующего в технологии углепластиков повысило их прочность при сжатии и сдвиге на 25 %, ударную вязкость — на 45 %, остаточную прочность — в 1,5 раза, рабочую температуру эксплуатации — на 30 %, теплопроводность — до 5 раз и рабочий ресурс — в 1,8 раза. Применение углепластика в качестве молниестойкого покрытия летательных аппаратов позволяет уменьшить их массу из расчета 0,5 кг/м² защищаемой поверхности.

Модифицирование полимеров наночастицами позволяет решать задачи по улучшению не только конструкционных, но и функциональных свойств.

Для повышения огнестойкости полимеров эффективны добавки наночастиц неорганических веществ. Термопластики, модифицированные 3 % наносиликатов, пожаробезопасны. Их применение обеспечивает снижение массы и трудоемкости изготовления приборов и агрегатов авионики до 7 раз.

Высокая абляционная стойкость полимерных композитов с наноразмерными неорганическими добавками открывает перспективы их использования в качестве теплозащитных материалов для тепловых машин современной техники. Например, введение менее 2 % наночастиц алюмосиликатов в полимер уменьшило скорость его эрозии высокотемпературным (свыше 2000 °C) газовым потоком в 10 раз. Огнестойкость полимера повышается в результате образования в процессе его взаимодействия с окислительной средой жесткого слоя неорганической окалины.

Предложены теоретические основы и технологические принципы создания нового поколения нанокомпозитов системы металл—полимер [4]. Они состоят из наноразмерных частиц квазикристаллического

сплава, гомогенно распределенных в полимерной матрице.

Наиболее распространенным способом введения наночастиц металла в полимерную матрицу является их термическое восстановление из карбонилов соответствующего металла. Данная технология позволяет вводить в полимерную матрицу настолько большое количество нанонаполнителя, что возникает вопрос о классификации такого композита: относится ли он к полимерам с металлическим нанонаполнителем или является металлом, пропитанным полимером.

Объемный нанофрагментированный материал. Технологические принципы измельчения дискретных элементов структуры до наноразмерного диапазона, которое известно под названием "фрагментирование", разработаны применительно к металлическим материалам и базируются на известных из металловедения процессах термомеханической обработки металлов [5].

Один из способов фрагментации структуры сталей использует закономерности эвтектоидного превращения железоуглеродистых сплавов. Техническая реализация этого способа заключается в осуществлении технологического процесса, который называют маятниковым отжигом.

Для фрагментации структуры сталей можно использовать и физико-химические превращения в критической точке  $A_3$ . В процессе охлаждения в критической точке  $Ar_3$  из аустенита выделяется феррит, а при нагревании в точке  $Ac_3$  феррит растворяется в аустените. В процессе многократных взаимопревращений  $\Phi \rightarrow A$  и  $A \rightarrow \Phi$  происходит измельчение зерна.

Наиболее разработанная методика фрагментации структурных элементов металлических материалов основана на особенностях процессов наклепа и рекристаллизации. В процессе холодной пластической деформации металла его зерна и составляющие их блоки мозаики ведут себя по-разному. Зерна не претерпевают измельчения. Под действием приложенной нагрузки зерно из равноосного превращается в неравноосное, сплющивается, сохраняя свой первоначальный объем. Дроблению подвергаются блоки мозаики с одновременным увеличением степени их разориентировки друг относительно друга. Многократное повторение холодного деформирования позволяет осуществлять контролируемую фрагментацию структуры металла.

В процессе первичной рекристаллизации наклепанного металла происходит дальнейшее фрагментирование структуры металла. Оно начинается с образования зародышей новых зерен и завершается полным превращением структуры деформированного металла в мелкозернистую. Вытянутые вследствие пластической деформации зерна наклепанного металла превращаются в мелкие зерна округлой формы, не имеющие предпочтительной ориентации.

Необходимым условием технической реализации данного способа фрагментации является четкое соблюдение кинетического режима технологического процесса: нагрев должен завершаться до начала про-

цесса вторичной рекристаллизации, когда начинается процесс роста одних, более крупных зерен, за счет других.

Одним из направлений практической реализации установленной фундаментальной наукой возможностей существенного повышения физико-механических характеристик конструкционных сталей является интенсивная пластическая деформация (ИПД).

Фундаментальные исследования процессов ИПД и разработка на их основе наноструктурированных металлов и сплавов впервые были начаты коллективом российских ученых в конце 80-х гг. прошлого столетия в Башкирии под руководством чл.-кор. Башкирской академии наук Р.З. Валиева [6].

Основным методом исследования процессов ИПД является равноканальное угловое прессование. Метод основан на пластическом деформировании образца путем многократного продавливания его внешним давлением через угловой канал равного диаметра. Повторными проходами образца через канал можно добиться накопления желаемой степени деформации и соответствующих структурных изменений металла. Практическим результатом работ уфимских ученых по реализации потенциальных возможностей метода является получение длинномерных прутков диаметром до 12 мм. Работа выполнена на примере титановых сплавов, ИПД которых позволила фрагментировать исходные зерна до размера около 70 нм, что привело к повышению предела выносливости сплавов в 2 раза и прочностных показателей – в 2,5 раза.

Основным препятствием для широкого применения метода ИПД в промышленности является необходимость многократного повторения технологических циклов деформирования исходного образца. Для устранения данного недостатка применяют различные варианты аппаратурного оформления технологического процесса ИПД.

Метод всесторонней изотермической ковки (другое название метода — "аbc"-прессование), принципиальная технологическая схема которого представлена на рис. 3, позволяет реализовать метод ИПД в условиях промышленного производства крупногабаритных изделий на заводском оборудовании. Фундаментальные исследования процесса и технологические работы по их воплощению в промышленный метод всесторонней изотермической ковки выполнены коллективом российских ученых под руководством академика РАН И.В. Горынина [7].

Метод основан на использовании сочетания процессов деформации и рекристаллизации для фрагментирования структуры в процессе поэтапной деформации заготовки в разных направлениях со снижением температуры каждого этапа последующей деформации. Это дает возможность измельчить зерна металла вплоть до наноразмерных величин, избегая разрушения заготовки. Число этапов и разность рабочих температур деформации между этапами зависят от типа металла и его исходной микроструктуры.

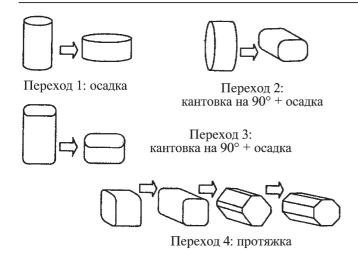


Рис. 3. Технологическая схема всесторонней изотермической ковки

Наноструктурированные стали, полученные методом всесторонней изотермической ковки, применяют для производства магистральных газо- и нефтетрубопроводов большого диаметра, предназначенных для эксплуатации в сложных природно-климатических условиях Крайнего Севера, в морской воде и сейсмически активных горных районах Восточной Сибири.

Заключение. Технический потенциал различных модификаций объемных наноматериалов реализован преимущественно в передовых отраслях машиностроения. Их более широкому распространению в отрасли массового производства препятствует недостаточная отработанность промышленной технологии получения и консолидации наноразмерного наполнителя в объемный материал, что обусловливает высокую стоимость продукции с нанодобавками.

Однако эти неизбежные трудности становления принципиально нового вида продукции будут успешно преодолены в ближайшем будущем. Проводятся технологические работы по введению углеродных наночастиц в крупнотоннажную продукцию. Нанотехнологию начинают применять в производстве самой массовой крупнотоннажной продукции — бетона, который широко применяют в строительстве [8].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Петрунин В.Ф.** Ультрадисперсные порошки российская ниша наноматериалов и перспективная база нанотехнологий // Экология XXI век. 2005. № 3.
- 2. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Бикбаева З.Г. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов. Томск: Издательство ТПУ, 2008.
- 3. **Волков Г.М.** Объемные наноматериалы. М.: "Кно-Рус", 2011.
- 4. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000.
- 5. **Волков Г.М., Зуев В.М.** Материаловедение: учеб. для вузов. 3-е изд., стер. М.: Академия, 2013.
- 6. **Валиев Р.З., Александров И.В.** Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Академкнига, 2007.
- 7. **Горынин И.В.** Создание конструкционных и функциональных наноматериалов // Инновации. 2008. № 6.
- 8. **Пономарёв А.Н.** Высококачественные бетоны. Анализ возможности и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6.

Георгий Михайлович Волков,  $\partial$ -p техн. наук, recom@list.ru





## ООО "Издательство Машиностроение" продолжает подписку на журнал

#### «ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

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

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

107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4,

тел.: (499) 269-6600, 269-5298, факс: (499) 269-4897,

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

#### RNHAMGOOHN

УДК 378.162.36:621.791

М.В. Мельник (Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина, Белоруссия),
В.М. Ямпольский (Московский государственный университет приборостроения и информатики)

## Анализ системы подготовки будущих педагогов-инженеров по специальности "Мастер производственного обучения рабочих для сварочного производства"

Определены направления работы по усовершенствованию методики преподавания и качества преподаваемого материала по дисциплине "Производственное обучение (сварочное дело)".

Ключевые слова: педагог-инженер; мастер производственного обучения; сварочное производство.

The areas of work to improve of technique of teaching and quality of taught material on the discipline "Industrial training (welding practice)" are defined.

**Keywords:** engineer-teacher; master of vocational training; welding production.

В машиностроении и строительстве сооружений различного рода коммуникаций сварка металлов является одним из основных процессов. Сварка позволила создать принципиально новые конструкции машин, внести коренные изменения в конструкцию и технологию производства.

Важным условием успешного освоения сварочной техники является постоянное совершенствование профессиональной подготовки сварщиков в профессионально-технических, технических и других учебных заведениях системы профессионально-технического образования.

При этом необходимость повышения общего уровня профессиональной квалификации рабочих и специалистов диктуется внедрением мировых стандартов.

В ряде случаев с уровнем профессионального мастерства напрямую связана проблема обеспечения безопасности эксплуатации сварной конструкции. В частности, недостаточный уровень профессионального мастерства сварщика или специалиста сварочного производства нередко является причиной разрушения магистральных трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, нефтехимического оборудования и др.

В связи с этим вопросам профессиональной подготовки сварщиков и специалистов сварочного производства уделяется большое внимание во всех промышленно развитых странах. Европейское общество сварщиков разработало единые минимальные требования к подготовке персонала сварочного производства в Западной Европе. Позже к этому процессу присоединился Международный институт сварки. Разработка единых требований, программ, методик подго-

товки персонала дает работодателю уверенность в том, что он может рассчитывать на определенный уровень профессионализма исполнителей и руководителей сварочного производства [1].

Важную роль в профессиональной подготовке сварщиков играет производственное обучение. Качество подготовки сварщиков во многом зависит от степени подготовки преподавателей и мастеров производственного обучения, от уровня их квалификации.

Анализ современного состояния технологического базиса свидетельствует о том, что сварочное производство недостаточно оснащено высококвалифицированными специалистами, в то же время усложняются технологические процессы выполнения сварочных работ. В связи с этим возрастает роль профессиональных знаний, умений, навыков, профессиональных качеств специалистов сварочного производства, которые обеспечивают согласование трудовых действий, объединение их в условиях профессиональной деятельности.

Для того чтобы профессиональные умения и навыки учащихся соответствовали уровню современного специалиста сварочного производства в производственном обучении, необходимо воспроизведение основных видов профессиональной деятельности специалистов сварочного профиля, это означает, что в учебных мастерских необходимо организовать реальное производство. Для формирования профессиональных умений содержание производственного обучения должно отражать основные виды сварочных работ и логику трудового процесса.

Проведенное исследование позволило определить требования к организации производственного обуче-

ния специалистов-сварщиков в соответствии с современной технической модернизацией сварочного произволства:

- прогресс сварочного производства связан с подготовкой специалистов; с развитием системы непрерывного образования; с внедрением интеграционных процессов в практику производственного обучения;
- система обучения специалистов-сварщиков строится на принципах: интеграции, системности, направленности на конкретное производство;
- производственное обучение рабочих в системе начального профессионального образования (НПО), формирование у них необходимых знаний и квалификаций, позволяющих соответствовать требованиям современных стандартов качества.

Анализ анкетирования руководителей образовательных учреждений системы НПО показал, что в современных условиях технического и информационного развития производства, осуществляя педагогическую деятельность, молодые преподаватели и мастера производственного обучения испытывают затруднения при проектировании содержания подготовки будущих рабочих, связанного с освоением новых технологий и новой техники, модернизацией технологических процессов, применением современных конструкционных материалов.

Данные мероприятия в полной мере относятся как к сварщикам, непосредственно выполняющим сварочные работы, так и к инженерам, технологам, другим специалистам сварочного производства, занимающихся их организацией и практической реализацией.

Однако в последние годы увеличивается дефицит квалифицированных сварщиков и специалистов по сварке, родственным технологиям и контролю в промышленно развитых и развивающихся странах. Такие же тенденции характерны и для России, Беларуси, других стран СНГ.

Наиболее перспективными методами совершенствования процесса подготовки сварщиков и специалистов по сварке являются методы, базирующиеся на использовании современных информационных технологий, включая возможности Интернета.

Информационные технологии эффективно совершенствуются по следующим направлениям:

- разработка и практическое использование электронных учебников (использование в электронных учебниках средств мультимедиа (графики, анимации, звука)) существенно повышают эффективность обучения [2];
- применение для самоподготовки или получения допуска к работе программ тестирования для проверки знаний, что позволяет проводить квалифицированную оценку знаний;
- применение имитаторов (тренажеров) для обучения практическим манипулированием сварочной дугой.

Теоретическую подготовку, как правило, осуществляют путем аудиторных и лабораторных занятий, при этом учебные планы строят по модульному принципу с обязательным контролем знаний и умений после завершения занятий по каждому модулю и окончательным экзаменом (зачетом) после завершения полного курса теоретической подготовки.

В процессе теоретических занятий используют плакаты, слайды, кино- и видеофильмы, аудиосредства, электрифицированные макеты и стенды, натуральные образцы сварочного оборудования, сварочных инструментов и материалов, технологических приспособлений и средств индивидуальной защиты.

Именно поэтому в последние годы наблюдается интенсивный поиск новых методик, форм и средств обучения сварщиков и специалистов сварочного производства, базирующихся на компьютерных мультимедийных технологиях. Применение таких технологий существенно расширяет возможности индивидуального обучения и самостоятельного приобретения знаний обучающимися, обеспечивает возможность их дистанционного общения с преподавателем через Интернет или посредством электронной почты, получения необходимой информации не только в виде текстов, но и в виде анимаций, видеофильмов, участия в дистанционных конференциях и занятиях, проводимых на интерактивной основе.

Наиболее значимые результаты по совершенствованию системы подготовки сварщиков и специалистов сварочного производства достигнуты в Германии. В частности, новые образовательные концепции и средства обучения с широким использованием информационных технологий и Интернета продвигаются на мировой рынок компаниями GSI и SLV (Германия). Их применение демонстрирует ряд преимуществ по сравнению с классическими методами путем аудиторных занятий — индивидуальный выбор времени и вида обучения, индивидуальный темп обучения, сокращение его стоимости, возможность обучения и повышения квалификации без отрыва от работы.

Эффективность методов дистанционного и смешанного обучения признана Немецким обществом сварщиков (DVS), EWF и Международным институтом сварки IIW, эти методы рекомендованы для широкого использования в международной системе образования сварщиков и специалистов по сварке и родственным технологиям. В соответствии с новыми тенденциями происходит унификация требований к качеству продукции сварочного производства с взаимопризнанием различных систем аттестации и подготовки специалистов.

В зависимости от уровня специалиста соотношение практической и теоретической подготовки должно изменяться: от 5...10 % теории и 90...95 % практики для сварщиков и соответственно 70 и 30 % — для инженеров.

Очевидно, что обучение сварщиков, повышение их квалификации и поддержание навыков и умений вы-

полнения различных видов сварки с учетом отмеченных особенностей методов профессиональной подготовки являются сложными, дорогостоящими и энергоемкими процессами, если их выполнять в реальных условиях на сварочном оборудовании с использованием сварочных материалов и образцов.

Поэтому практически одновременно с развитием сварочной науки и техники возник интерес к созданию технических средств обучения сварщиков, в частности тренажерно-обучающих устройств и систем, которые предоставляют обучающимся возможность усвоить необходимые навыки ведения процесса сварки, сократить сроки и повысить качество обучения, существенно снизить стоимость обучения за счет значительной экономии материалов и электроэнергии и которые можно использовать на всех стадиях подготовки сварщиков — от профессионального отбора до допускного контроля и аттестации.

Заключение. В современных условиях усложнения сварных конструкций и роста объема сварочных работ большую роль играет качественная подготовка (теоретическая и практическая) квалификационных рабочих — сварщиков, которые способны решать эти проблемы.

Преодоление негативных тенденций дефицита квалифицированных сварщиков и специалистов сварочного производства, а также решение задачи подготовки соответствующего современным требованиям персонала возможно только при условии повышения эффективности профессионального образования и модернизации процесса подготовки сварщиков и

специалистов по сварке с использованием современных информационных технологий.

В современных условиях традиционного обучения значительная часть будущих рабочих-сварщиков имеет недостаточный уровень знаний по специальности "Сварка". Поэтому целесообразно вносить изменения не только по методике проведения занятия по дисциплине "Производственное обучение (сварочное дело)", но и по качеству преподаваемого материала в рамках специальности, для чего предложено совмещение известных методов преподавания и разработка новых технических средств обучения, необходимых для усиления знаний обучающихся в области сварочного производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Информационные** технологии при подготовке сварщиков и специалистов сварочного производства: современные тенденции / Б.Е. Патон и др. // Сварка и диагностика. 2010. № 1. С. 10—15.
- 2. Электронное средство обучения как инновационное направление в системе подготовки будущих педагогов-инженеров: (на примере изучения дисциплины "Методика производственного обучения") / С.Н. Щур, Э.Е. Гречанников, П.И. Савенок, А.Р. Литовский // Веснік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І.П. Шамякіна. 2011. № 1 (30). С. 70—78.

Мария Васильевна Мельник; Виктор Модестович Ямпольский, д-р техн. наук, vyam@bk.ru

**\* \* \***-

УДК 616.314-76

**И.Р. Дорошина, Е.А. Кристаль, М.В. Михайлова, А.В. Юмашев** (Первый Московский госдурственный медицинский университет им. И.М. Сеченова)

#### Изменение химического состава стоматологических сплавов в процессе литья

Представлены результаты изменения химического состава кобальтохромового стоматологического сплава в процессе литья. Получено, что свойства стоматологических сплавов в процессе литья ухудшаются.

Ключевые слова: стоматологический сплав; кобальтохромовый сплав; химический состав; литье.

The results of changes in the chemical composition of the cobalt and chromium dental alloy in the casting process are presented. The findings suggest that changes in the properties of dental alloys in the casting process aside their deterioration.

Keywords: dental alloy; cobalt and chromium alloy; chemical composition; casting.

**Актуальность исследования.** Современные достижения ортопедической стоматологии в значительной степени основываются на использовании передовых технологий и современных материалов.

В настоящее время в ортопедической стоматологии для изготовления зубных протезов применяют бо-

лее 500 разнообразных по своей химической природе материалов.

На стоматологическом рынке представлен широкий ассортимент различных литейных сплавов, среди которых техник-литейщик выбирает оптимальный для данной клинической ситуации и планируемой конструкции.

Требования, предъявляемые к качеству литья, относятся не только к форме отливки, они складываются из комплекса иногда противоречивых требований, которые определяются функциональными показателями конструкции.

Нередко в зуботехнических литейных лабораториях используют вторичное сырье, которое по составу и свойствам значительно отличается от исходного. Это приводит к снижению качества ортопедических конструкций: наличию шероховатостей на поверхности сплава, усилению коррозии и увеличивает риск непереносимости стоматологических материалов [1].

В настоящее время в медицине разрешен к практическому применению ряд специальных сплавов на основе кобальта, никеля, титана, железа, золота. Из этих стоматологических сплавов изготовляют вкладки, накладки, искусственные коронки и мостовидные протезы, а также съемные протезы.

Стоматологические сплавы делятся на 2 большие группы: сплавы благородных и неблагородных металлов. Благородные сплавы состоят из золотосодержащих (с высоким и низким содержанием золота), палладиевых сплавов с содержанием меди или серебра, сплавов серебра. Неблагородные сплавы включают в себя кобальтохромовые сплавы с высоким и низким содержанием молибдена, никелевые сплавы с содержанием хрома менее 15 % и более 20 %, никелид титана, стали.

Особое место занимают сплавы титана. С химической точки зрения и зуботехнической обработки титан принадлежит к сплавам неблагородных металлов, имеет механические свойства, которые больше свойственны сплавам благородных металлов.

Самое большое влияние на свойства распространенных неблагородных стоматологических сплавов оказывают легирующие элементы: хром, никель и кобальт. Суммарное количество их в сплаве достигает обычно около 90 %. Эти элементы образуют основную фазу — матрицу сплава. Хром, как основной компонент, входит в состав всех сплавов. Он обеспечивает коррозионную стойкость и прочность.

Кобальтохромовые стоматологические сплавы не должны содержать более 29 % хрома. При содержании хрома выше 30 % в сплаве образуется хрупкая сигмафаза, что ухудшает его механические и литейные свойства.

Международный стандарт "Стоматологические литейные сплавы на металлической основе" — ISO 6871-01 устанавливает, что содержание хрома, кобальта в сплавах должно быть в сумме не менее 85 %.

Помимо свойств металлической матрицы, имеющей определенную кристаллическую решетку и тем самым определяющую основные параметры механических свойств сплава, на механические свойства могут оказывать влияние дополнительное легирование такими элементами, как молибден, вольфрам, ниобий, углерод, азот и пр.

Эти элементы влияют на свойства самой фазы — матрицы и стимулируют образование новых фаз: кар-

бидов и нитридов, которые также увеличивают фазовый наклеп, и тем самым твердость и прочность сплава. Значительное повышение прочности происходит при легировании кобальтохромовых сплавов 4...6 % молибденом и дополнительно 1...2 % ниобием в присутствии 0,2...0,3 % углерода.

Изменение содержания углерода в кобальтохромовых сплавах даже на несколько десятых процента сильно изменяет их свойства. Увеличение углерода на  $0,2\,\%$  по сравнению с номинальным содержанием в кобальтохромовых сплавах приводит к тому, что сплав становится очень твердым и хрупким, а уменьшение на  $0,2\,\%$  — к ухудшению текучести и уменьшению предельной прочности на разрыв. Каркас бюгельного протеза из такого сплава может деформироваться.

Для увеличения прочности никельхромового сплава для изготовления протяженного мостовидного протеза, с последующим нанесением керамической массы можно добавить 10...15 % бюгельного кобальтохромового сплава с большим содержанием углерода. В небольших количествах никель и кобальт могут заменить друг друга. Или наоборот, чтобы снизить твердость мостовидного протеза из кобальтохромового сплава, можно добавить 10...15 % никельхромового сплава, не содержащего углерод.

Таким образом, на свойства отливки существенно влияют даже незначительные изменения состава сплава по углероду, азоту и кислороду, так же как и технологические параметры плавки: температура расплава, время нахождения расплавленного металла в тигле, материал тигля, его температура, температура литейной формы, ее геометрия и размеры и пр. Для получения качественных литых стоматологических протезов необходим строгий контроль над всем процессом плавления

*Цель исследования* — изучить изменение состава стоматологических сплавов в процессе литья.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели был взят образец отечественного кобальтохромового стоматологического сплава. Проведен химический анализ до и после процесса литья, в ходе которого исследовано процентное содержание основных металлов в сплаве.

Структуру сплавов изучали на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA LMH с катодом  $LaB_6$  и системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy.

Использовали режимы отраженных электронов и вторичных электронов. Траектория отраженных электронов носит прямолинейный характер. Число отраженных электронов зависит от атомного номера элементов вещества объекта. Чем больше атомный номер зондируемого вещества, тем больше электронов содержат атомы, тем интенсивнее обратное рассеяние быстрых электронов и тем светлее будут выглядеть эти участки. Таким образом, при этом режиме работы

микроскопа достигается максимальный фазовый контраст.

Энергия вторичных электронов невелика (10 эВ). Поэтому вторичные электроны, образующиеся на значительной глубине, рекомбинируют с ионизированными атомами, и область объекта, которая дает эффект вторичной электронной эмиссии, имеет глубину менее 50 нм и диаметр, незначительно превышающий диаметр электронного зонда. Таким образом, изображение во вторичных электронах имеет гораздо лучшее разрешение, чем изображение в отраженных электронах (с увеличением до 100 тыс. крат).

Микрорентгеноспектральный анализ проводили на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA LMH с приставкой для проведения анализа Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy (включая INCA Energy 350)/X-max 50 — система рентгеновского энергодисперсионного микроанализа с безазотным детектором X-max 50 Standard (кремний-дрейфовый детектирующий элемент активной площадью 50 мм²; разрешение на линии  $MnK\alpha-127$  эВ).

Метод микрорентгеноспектрального анализа использует возбуждение характеристического рентгеновского излучения пучком электронов — "электронный зонд". Этот зонд может быть сфокусирован с помощью электронных линз, что позволяет анализировать состав микроучастков или элементов микроструктуры сплава. Глубина проникновения электронов в поверхность образца для драгоценных металлов при напряжении 20 кВ (стандарт) составляет около 0,2...0,5 мкм.

Качественный элементный состав микрообъемов определяется сравнением наблюдаемых и заложенных в анализатор длин волн характеристического излучения. Количественный анализ проводили на основе разностей интенсивности излучения наиболее сильной линии K- или L-серии характеристического излучения определяемого элемента.

#### Результаты исследования.

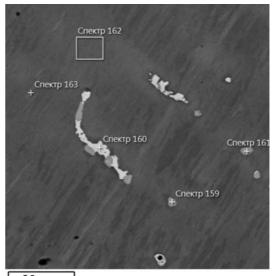
На рисунке представлены растровые электронномикроскопические снимки поверхности переплавленных образцов некоторых спектров кобальтохромового стоматологического сплава.

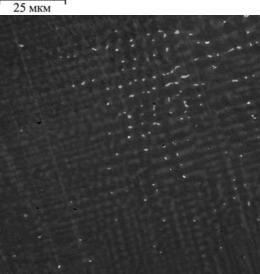
Суммарное содержание кобальта и хрома в исследуемом стоматологическом сплаве до начала литья составляло 85 %, что соответствует международным стандартам.

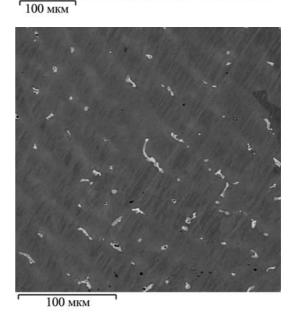
Локальный анализ поверхности образцов показал, что все образцы имеют практически одинаковый и соответствующий паспортным данным состав (табл. 1).

Химический анализ показал, что состав исследуемого сплава изменился в процессе литья, однако по данным анализа спектров состав сплава изменился незначительно. Суммарное содержание хрома и кобальта по завершении процесса литья составило 81...83 % (табл. 2).

Основными компонентами исследуемых сплавов являются хром и кобальт. Эти элементы образуют ос-







Электронное изображение поверхностей переплавленных образцов стоматологических сплавов

1. Химический состав сплава до литья (по спектрам),	%	Ś
---	---	---

Номер спектра	Cr	Со	Ni	Ga	Mo	W
158	25,10	60,88	0	1,61	5,11	7,30
164	25,12	60,99	0	1,61	4,97	7,31
165	25,11	62,31	0	0,55	4,97	7,05
169	25,23	62,07	0	0,49	5,31	6,90
182	25,26	62,28	0	0,53	5,13	6,80

#### 2. Химический состав сплава после литья (по спектрам), % мас.

Номер спектра	Cr	Со	Ni	Ga	Mo	W
158	22,13	60,60	0	0,96	9,51	6,87
164	20,80	56,90	0	1,13	5,23	8,56
165	21,28	60,13	0	0,22	8,32	6,55
169	23,86	50,92	0	0,54	2,31	5,44
182	22,65	48,23	0	0,23	3,81	6,25

новную фазу — матрицу сплава [2]. При изменении процентного содержания указанных химических элементов в сплавах образуется хрупкая сигма-фаза, что существенно ухудшает технологические свойства сплавов и может влиять на их биосовместимость в полости рта [2].

В связи с этим повторное использование сплава может привести к возникновению дефектов литья, накоплению металла в тканях и появлению индуцированных гальванических токов, что в свою очередь приводит к усилению коррозии металлов. Кроме того, техник-литейщик должен тщательно следить, чтобы отходы от неочищенного тигля с предыдущей плавки коррозионно-стойкой стали не попали в сплав, предназначенный для металлокерамических работ [3, 4].

Таким образом, для получения качественных литых ортопедических конструкций необходимы сертифицированные стоматологические сплавы и четкое выполнение технологии литья, что позволит снизить риск осложнений и возникновения явлений непереносимости стоматологических материалов в полости рта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Лебедев К.А., Митронин А.В., Понякина И.Д.** Непереносимость стоматологических материалов. Москва, 2009. 204 с.
- 2. Скоков А.Д. Сплавы в ортопедической стоматологии // Новое в стоматологии. 1998.  $\mathbb{N}$  1. С. 28—39.
- 3. Свирин В.В., Косилин А.В., Попов Д.Н. Особенности точного стоматологического литья // Зубной техник. 2004. № 3. С. 46—48.
- 4. **Гарамов Л.** Литейное дело. Практические примеры // Зубной техник. 2004. № 6. С. 32—34.

Илона Романовна Дорошина; Екатерина Александровна Кристаль, akristal@yandex.ru; Мария Владимировна Михайлова, Алексей Валерьевич Юмашев, канд. мед. наук



**Г.Г. Мухин** (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

## Вклад И.И. Сидорина в развитие инженерного образования



Иван Иванович Сидорин (1888—1982) — крупный ученый в области металловедения, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

И.И. Сидорин родился в Москве. В 1914 г. окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана (бывшее Императорское московское техническое училище) и более полувека проработал в МГТУ им. Н.Э. Баумана, занимая должности доцента, профессора, заведующего кафедрой "Металловедение". Он читал лекции, руководил практикой студентов на промышленных предприятиях, учил аспирантов. Многие из дипломников под его руководством выполняли даже небольшие исследовательские работы.

Иван Иванович в начале 20-х годов прошлого века проводил испытания материалов, используя лабораторную базу МГТУ. Фактически он стал одним из основателей авиационного материаловедения, где к материалам предъявляют особо жесткие требования по массе, прочности и надежности.

Его исследования свойств и термического упрочнения нового материала — кольчугалюминия (аналога известного дуралюмина Д1) способствовали появлению первого цельнометаллического самолета АНТ-2. Этот самолет, созданный А.Н. Туполевым, был успешно испытан в первом полете в мае 1924 г.

В 1924 г. И.И. Сидорин настоял на введении в программу обучения студентов-механиков всех специальностей новой дисциплины "Металловедение и термическая обработка", он же стал первым лектором по этому курсу.

В конце 1920 г. на механико-технологическом факультете появились новые кафедры:

- технологии машиностроения;
- металлорежущих станков;
- машин и технологии обработки металлов давлением;
  - литейного производства;
  - основ взаимозаменяемости.

Одной из первых в мире в МГТУ была открыта кафедра "Металловедение" (1929 г.), основателем которой И.И. Сидорин.

Иван Иванович стал убежденным сторонником подготовки инженеров-металловедов на базе машиностроительных специальностей. В МГТУ такая подготовка началась позднее, и первый выпуск инженеров-металловедов состоялся в 1934 г.

Позднее была организована специальность "Материаловедение в машиностроении", по которой более десяти вузов начали подготовку специалистов-металловедов. Эта подготовка дополнялась специализациями, в которых учитывалась потребность ближайшего региона в инженерах, знающих материалы и их термическую обработку.

За десять лет работы на машиностроительном заводе инженеры-металловеды становятся взаимозаменяемыми независимо от профиля вуза, где они получили образование. Однако целесообразность подготовки металловедов на основе машиностроительных специальностей получила подтверждение практическими достижениями выпускников МГТУ.

Когда кафедра уже действовала, но еще не начала выпускать инженеров, И.И. Сидорин предложил десяти студентам изменить направление своей подго-

товки в вузе и сосредоточиться на изучении металловедения. Среди них были С.Т. Кишкин и Н.М. Скляров, ставшие в дальнейшем авторитетными специалистами в области авиационных материалов. После окончания МГТУ им поручили совершенствовать танковую броню, а с 1932 г. уже в ВИАМе они разрабатывали стали для защиты самолетов.

Когда началась Великая Отечественная война, С.Т. Кишкин и Н.М. Скляров в короткий срок разработали прочный и технологичный материал для авиации. Повышенная прочность стали позволила снизить массу элементов броневой защиты самолетов. Штурмовик Ил-2 с броневой защитой внес весомый вклад в достижение победы. В годы войны были изготовлены 40 тыс. таких самолетов. В 1942 г. С.Т. Кишкин и Н.М. Скляров были удостоены Сталинской премии за разработку брони.

В 1932 г. И.И. Сидорин перешел в только что организованный ВИАМ на должность заместителя начальника по научной работе. В МГТУ он продолжил читать лекции по основным дисциплинам подготовки металловедов и руководить дипломниками.

В МГТУ под руководством И.И. Сидорина пересматривались программы и общего курса материаловедения, и специальных курсов — основы для подготовки инженеров-материаловедов. И.И. Сидорин активно участвовал в подготовке новой версии учебника по материаловедению, в котором промышленные материалы были классифицированы по их эксплуатационным свойствам. Этому учебнику в 1986 г. была присуждена Государственная премия СССР. Авторы учебника стали лауреатами Государственной премии СССР. Этой наградой был достойно отмечен многолетний труд проф. И.И. Сидорина в развитии инженерного образования в России.

И.И. Сидорин своевременно находил оптимальные пути совершенствования и развития учебного процесса. Это относилось, прежде всего, к обучению аспирантов и тематике дипломного проектирования.

Продолжительный летний отпуск он считал благодатным временем для творческой работы, когда можно обдумать и написать статьи, подготовить отчеты и заняться лекциями. К лекциям он готовился тща-

тельно, чтобы содержание было выверенным и современным. Он читал лекции без спешки, его манеры, содержательность излагаемого материала, правильная русская речь и трудно уловимое "чуть—чуть" импонировали студенческой аудитории и принесли Ивану Ивановичу заслуженный авторитет.

Я являюсь учеником Ивана Ивановича. Мне довелось слушать его лекции, он был моим руководителем при прохождении преддипломной практики и выполнении дипломного проекта, а после окончания аспирантуры я проработал вместе с ним на кафедре "Материаловедение" МГТУ более 20 лет.

В жизни И.И. Сидорина возникали задачи, для решения которых ему приходилось опираться на интуицию. Приведу пример. В годы Великой Отечественной войны И.И. Сидорин работал в Казани на авиамоторном заводе и был командирован в Ижевск для приема партии стального полуфабриката для своего завода. Как вспоминал И.И. Сидорин, в Ижевске развивалась своя, местная технология выплавки и обработки стали. После испытания стали и измерения ударной вязкости получили хорошие показатели, а вот исследования микроструктуры показали крупнозернистость. В то время, как и в наше время, крупнозернистость расценивается как недостаток.

Теперь появились сомнения и у Ивана Ивановича. Местные специалисты в Ижевске спросили его прямо: "Что Вам нужно — ударная вязкость или размер зерна?". "Я подумал, подумал и принял эту сталь". Завод в Казани получил крайне необходимый металл, и отрицательных последствий из-за крупнозернистости не было

Этот небольшой эпизод из жизни И.И. Сидорина показывает, что он не был догматиком.

Атмосфера, окружавшая И.И. Сидорина, была благом для сотрудников. Он, как маяк, проявлял качества интеллигента, выросшего и воспитанного на русской культуре. Общение с ним делало нас наследниками богатства духовной культуры, которым отличалась техническая интеллигенция России во все времена.

Герасим Герасимович Мухин, канд. техн. наук, проф.

ООО "Издательство Машиностроение", 107076, Москва, Стромынский пер., 4 Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru** Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. http://www.mashin.ru Дизайнер *Подживотов К.Ю*. Технический редактор *Жиркина С.А*. Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е*. Сдано в набор 12.03.2014 г. Подписано в печать 24.04.2014 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена. Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение". Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.



### риздательство Имициностроение

#### н.п. алешин



Цена 1000 р.

## **ПРИОБРЕСТИ КНИГУ**В ИЗЛАТЕЛЬСТВЕ

можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00

и на сайте WWW.MASHIN.RU

# ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

учебное пособие

2013 г. Объем 576 с. Формат 60х88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-695-6





Рассмотрены дефекты сварных соединений и физические методы неразрушающего контроля, основанные на использовании различных излучений и их взаимодействий с объектами контроля. Приведены классификации и рекомендации по выбору методов неразрушающего контроля. Изложены сведения по теории, оборудованию и технологиям методов дефектоскопии различных типов сварных соединений.

Для студентов, бакалавров, магистров, подготовка которых осуществляется в области сварочного производства, а также специалистов, проходящих сертификацию по EN 437.





## ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ



## Справочник КОВКА в 4-х томах И ШТАМПОВКА

Председатель редакционного совета Е.И. Семенов, засл. деятель науки и техники РФ, д-р техн. наук, проф.

Издание 2-е, исправленное и дополненное. 2010. 2521 с. ISBN 978-5-217-03459-8

Цена 10 000 р.

> Том 1. МАТЕРИАЛЫ И НАГРЕВ. ОБОРУДОВАНИЕ. КОВКА

Том 2. ГОРЯЧАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА

Том 3. ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА. ШТАМПОВКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Том 4. ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

#### Приобрести книгу по цене издателя

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