ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 3 март 2013

**Председатель редакционного совета и Главный редактор**
СЕМЁНОВ Е.И.

**Зам. председателя редакционного совета:**
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

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

**Редакционный совет:**
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГАРИБОВ Г.С.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЕВСЮКОВ С.А.
ЕРШОВ М.Ю.
КАСАТКИН Н.И.
КИДАЛОВ Н.А.
КОРОТЧЕНКО А.Ю.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ В.И.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ШЕСТАКОВ Н.А.
ШПУНЬКИН Н.Ф.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.
БАСТ Ю.
ТУТМАН Т.
ЭРКСЛЕБЕН С.

**Ответственный за подготовку и выпуск номера**
ЛУТОВИНИНА О.Н.
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### Литейное и сварочное производства

**Леушин И.О., Грачев А.Н., Алексеенко А.Л.** Применение отходов производства поливинилхлорида в литейно-металлургических технологиях . . . 3
**Рыбкин В.А., Чернышев П.А.** Динамика формирования конечного размера отливок радиоэлектронной промышленности . . . 7
**Лебедев В.А., Лендел И.В.** Управление импульсным движением электродной проволоки при механизированной сварке за счет изменения шага подачи . . . 10
**Лопота В.А., Туричин Г.А., Цибульский И.А., Сомонов В.В., Кузнецов М.В.** Перспективы внедрения волоконных лазеров для лазерной термообработки черных металлов . . . 15

### Кузнечно-штамповочное производство

**Потапов А.И., Харитонин С.В.** Сопротивление деформации титановых сплавов при температурах теплой и горячей обработки давлением . . . 18
**Осадчий В.Я., Леняшин В.Б., Князев Я.О.** Инновационная технология штамповки компрессорных лопаток небольшой длины . . . 22
**Боташев А.Ю., Бисилов Н.У.** Исследование газовой листовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки . . . 25

### Прокатно-волочильное производство

**Кохан Л.С., Пунин В.И., Ремпель Г.Б.** Вальцовка профилей с параболическим сечением . . . 29
**Сысоев С.Н., Никитин Р.А., Федотов А.В.** Камерный захватный агрегатный модуль для транспортировки бухты медной трубки упорядоченной намотки . . . 35

### Материаловедение и новые материалы

**Волков А.М., Гарибов Г.С.** Влияние температурных режимов закалки на структуру и механические свойства дискового гранулируемого жаропрочного никелевого сплава . . . 38
**Галкин В.В., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А., Кошелев С.В.** К вопросу о построении диаграмм рекристаллизации металла . . . 43

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

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

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

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

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

# BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 3 March 2013

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

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

**Editorial Assistant**
SERIKOVA E.A.

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

**This issue prepared with assistance of specialist**
LUTOVININA O.N.
SERIKOVA E.A.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

## CONTENTS

### Casting and Welding Productions

**Leushin I.O., Grachev A.N., Alekseenko A.L.** Application of polyvinylchloride waste products in casting and metallurgical technologies . . . 3
**Rybkin V.A., Chernyshev P.A.** Dynamics of castings finite size formation of radio-electronic industry . . . 7
**Lebedev V.A., Lendel I.V.** Control impulsive move electrode wire in mechanized welding by change of steps movements . . . 10
**Lopota V.A., Turichin G.A., Tsibul'sky I.A., Somonov V.V., Kuznetsov M.V.** Prospects for introduction of fiber lasers for laser heat treatment of ferrous metals . . . 15

### Forging and Stamping Productions

**Potapov A.I., Kharitonin S.V.** Flow stress of titanium alloys by temperature of warm and hot deformation . . . 18
**Osadchy V.Ya., Lenyashin V.B., Knyazev Ya.O.** Innovative technology stamping of compressor blades of small length . . . 22
**Botashev A.Yu., Bisilov N.U.** Research of gas sheet punching with bilaterial heating of stock material . . . 25

### Rolling and Drawing Productions

**Kokhan L.S., Punin V.I., Rempel' G.B.** Forge-rolling of profiles in parabolic caliber . . 29
**Sysoev S.N., Nikitin R.A., Fedotov A.V.** Chamber capture modul for transportation of coil of copper pipes of ordered winding . . . 35

### Physical Metallurgy and New Materials

**Volkov A.M., Garibov G.S.** Effect of temperature conditions of solution heat treatment on microstructure and mechanical properties of disk granulated Ni-base superalloy . . . 38
**Galkin V.V., Tereshchenko E.G., Derbenev A.A., Koshelev S.V.** To development of issue of construction of metal recrystallization curves . . . 43

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

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

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

УДК 621.74

**И.О. Леушин, А.Н. Грачев, А.Л. Алексеенко**
*(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

# Применение отходов производства поливинилхлорида в литейно-металлургических технологиях

*Рассмотрены варианты использования солесодержащих шламов – отходов производства поливинилхлорида в литейно-металлургических технологиях в качестве: 1) формовочных и стержневых смесей для стального, чугунного и цветного литья; 2) материала насыпных зернистых фильтров для рафинирования алюминиевых расплавов; 3) футеровочного материала плавильных печей и литейных ковшей.*

**Ключевые слова:** промышленные отходы; отходы химической промышленности; поливинилхлорид; шлам производства поливинилхлорида; литейно-металлургическое производство; формовочные и стержневые смеси; фильтрационное рафинирование алюминиевых расплавов; зернистый фильтр; футеровочный материал.

*Some alternatives of salt-containing sludge's use in casting and metallurgical technologies are considered: 1) sand blend for ferrous and non-ferrous alloys; 2) material for granular filter for aluminum alloys refinement; 3) covering material for melting furnaces and foundry ladles.*

**Keywords:** industrial waste; chemical waste; polyvinylchloride; casting and metallurgical production; moulding and core sands; filter refinement of aluminum melts; granular filter; lining material.

Процесс изготовления литой заготовки в разовой форме предполагает повышенный расход формовочных материалов: на 1 т годного литья приходится от 8 до 12 т формовочной смеси. Анализируя тенденции развития технологии изготовления литых деталей, можно отметить, что одним из приоритетных направлений является разработка новых связующих композиций и формовочных смесей, позволяющих улучшить технологические, экологические и (или) экономические показатели изготовления отливок.

Разработанные в последние годы связующие и формовочные смеси часто имеют в своем составе органические компоненты и обладают хорошими технологическими свойствами (в частности, быстро приобретают манипуляторную и конечную прочности, а также гарантируют облегчение выбиваемости отливок из формы и снижение пригара в большинстве случаев). Однако по экологическим показателям такие составы не всегда дают хорошую картину [1].

В отличие от органических связующих композиций неорганические материалы обладают более высокой температурой плавления и, следовательно, выделение вредных веществ при заливке и выбивке форм на основе неорганических компонентов будет существенно ниже. С другой стороны, устойчивость материалов к высоким температурам обусловливает плохую выбиваемость форм, и это обстоятельство ухудшает технологические свойства неорганических формовочных материалов.

Поэтому разработка новых материалов для изготовления форм и стержней в литейном производстве является актуальной задачей [2]. В этой связи исследователи все большее внимание уделяют отходам промышленных производств как потенциально перспективным формовочным материалам, что позволяет также решить проблему их утилизации, учитывая что в последнее время она вызывает повышенный интерес [3].

В качестве материала для использования в литейном производстве рассматривали залегающие в открытом карьере отходы химической промышленности завода "Капролактам", расположенного в г. Дзержинск Нижегородской области. Шлам, образующийся в результате технологической цепочки изготовления *поливинилхлорида* (ПВХ), представляет собой нетоксичные малоопасные смеси растворимых и нерастворимых солей и гидроксидов: NaCl, $NaSO_4$,

**Состав шлама, образующегося при производстве хлора, %**

| $H_2O$ | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | $Ca(OH)_2$ | NaCl | $NaSO_4$ | NaOH |
|---|---|---|---|---|---|
| 50,2 | 12,2 | 7,2 | 28,2 | 2,0 | 0,2 |

$Ca(OH)_2$, NaOH, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ в различном процентном соотношении. Основой шлама являются кварцевый песок и вода. Масса образующихся отходов составляет не менее 6000 т в год (по приблизительным оценкам).

*Цель работы* – поиск основных направлений применения данного отхода в литейно-металлургических технологиях, включая разработку технологии его применения на том или ином этапе процесса изготовления литой заготовки.

Исследуемый шлам образуется в результате выделения хлора для получения ПВХ из поваренной соли, добываемой на различных месторождениях. В таблице приведен состав образующихся отходов [4].

По окончании технологического процесса производства рассола образовавшийся шлам смешивается с неорганическими отходами (глина, песок – 45 %; вода – 40 %; NaCl – не более 25 %).

По мнению авторов статьи, химический состав шлама и его свойства делают его пригодным для использования в литейном производстве, в первую очередь, в качестве формообразующего материала.

Зернистой основой является кварцевый песок, а связующее воздействие оказывает сочетание растворенного NaCl и $CaSO_4$, которые применяют в качестве связующих в литейном производстве. Можно предположить, что упрочнение шлама при нагреве происходит по механизму "обезвоживания" с формированием "камня" по аналогии с цементными смесями. Это дает основания для того, чтобы прогнозировать хорошую выбиваемость формовочной смеси на основе шлама, поскольку солевые формы после заливки легко разрушаются с помощью гидравлической выбивки.

В ходе работы в качестве эталона принимали идеализированную модель формовочной смеси, наделенную следующими свойствами:

I. Экономические характеристики:

1. Низкая стоимость смеси, а также минимальные затраты времени и материалов на ее изготовление, подготовку и переработку.

2. Доступность материалов для смеси в больших количествах.

3. Способность смеси к восстановлению исходных свойств, т.е. регенерируемость.

II. Технологические характеристики:

1. Обеспечение качественного отпечатка поверхности модели или стержневого ящика.

2. Достаточная поверхностная и объемная прочность формы до заливки.

3. Минимальная прочность формы после заливки, обеспечивающая хорошую выбиваемость отливки из нее.

III. Экологические характеристики:

1. Отсутствие вредных или опасных для здоровья человека и окружающей среды компонентов в исходной смеси.

2. Минимальное газообразование и газовыделение при заливке литейной формы.

3. Инертность компонентов отработанной формовочной смеси по отношению к окружающей среде (безопасность отвалов).

Результаты исследований по блоку технологических характеристик со шламом показали, что данный материал способен к уплотнению и формообразованию.

Однако для получения качественного отпечатка на поверхности образцов необходимо обеспечить фиксированный рабочий уровень влажности формообразующего материала, а также точный контроль этого уровня. Начальная влажность шлама (~40 %) делает практически невозможным процесс уплотнения смеси, так как при приложении нагрузки к образцу происходит выдавливание шламового отхода. Следовательно, влажность исходного отхода необходимо снижать. Это достигается его подсушкой в муфельной печи при температурах 200...300 °С.

При этом необходимо знать минимально допустимый уровень влажности шлама, поскольку при влажности смеси 5...10 % образцы хотя и имеют хорошее качество поверхности, но не приобретают прочности и разрушаются при небольшом приложении силы. Таким образом, требуется обеспечить промежуточную оптимальную влажность, которая позволила бы изготовлять образцы с качественной поверхностью в сочетании с достаточной прочностью.

В связи с этим была проведена серия экспериментов по поиску оптимального уровня влажности, итогом которой явилось выявление "коридора формуемости" шламовых отходов производства ПВХ с влажностью 16...20 %. Наилучшее сочетание формуемости и прочности на сжатие в сыром состоянии показали образцы из шлама с влажностью 19,5 %. В этой серии экспериментов выявлено, что незначительное изменение влажности шлама (±2 %) оказывает существенное влияние на исследуемые свойства образцов, что вызвано природой взаимодействия веществ NaCl и $H_2O$.

Тем не менее при промышленном применении формовочных смесей из шламовых отходов ПВХ этот факт не вызовет сложности при условии четкого следования режиму сушки при конкретной температуре от уровня исходной влажности в течение определенного времени. Например, получено, что навеска 0,2 кг шламовых отходов ПВХ в ходе сушки при 300 °С в течение 5 мин с перемешиванием через 2,5 мин теряет 6 % влажности. Изменение массы навески потребует корректировки режима сушки шлама.

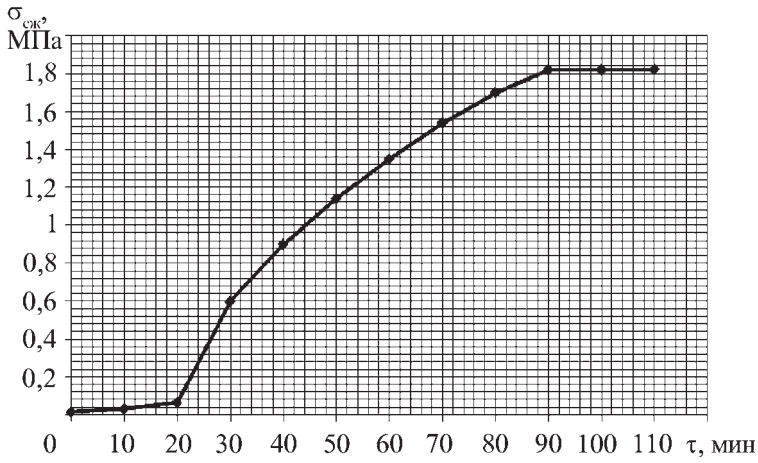



**Рис. 1. График нарастания прочности $\sigma_{сж}$ образца в процессе сушки**

Далее проводили эксперименты по определению прочности образцов в высушенном состоянии на сжатие. Образцы для определения прочности изготовляли по методикам ГОСТ 23409.7–78. На рис. 1 приведен график приобретения стандартным цилиндрическим образцом прочности на сжатие в процессе сушки при температуре ~300 °С. Прочность на сжатие контролировали по ГОСТ 23409.7–78 на стандартных цилиндрических образцах диаметром и высотой 50 мм, полученных на лабораторном копре трехкратным ударом падающего груза массой 6,35 кг. Использовали аппарат для определения прочности формовочных смесей модели LRu-2e.

Как видно из рис. 1, через 20...25 мин сушки образца происходит резкое повышение его прочности. Предположительно в этом промежутке времени основная масса содержащейся в шламе соли NaCl теряет свою влагу и обеспечивает эффект связывания смеси. Затем по мере сушки образца прочность постепенно повышается и достигает своего максимального значения 1,8 МПа через 90 мин после сушки.

На рис. 2 приведены сравнительные данные по прочности на сжатие формовочных смесей на неорганических связующих [5] и смесей из шламовых отходов ПВХ.

Таким образом, исследуемый материал после температурной обработки способен обеспечить прочность, уровень которой выше, чем у наиболее часто применяемых формовочных материалов. При этом он является достаточным для того, чтобы форма не разрушалась при транспортировке и заливке.

Механизм приобретения прочности шлама можно объяснить следующим образом: основной связующий эффект достигается за счет растворенного NaCl, который с помощью ионных связей обеспечивает прочность образца. В нерастворенном состоянии соли натрия этот эффект, очевидно, отсутствует. Поэтому в смеси должно присутствовать достаточное количество воды для того, чтобы растворить весь имеющийся в ней хлорид натрия. После удаления влаги из образцов происходит "окаменение" смеси, что обеспечивает хорошие поверхностную и объемную прочность.

В качестве рабочей гипотезы было выдвинуто следующее предположение: легкая растворимость хлорида натрия в воде обеспечит быстрое разупрочнение смеси при гидравлической выбивке формы и последующее легкое удаление отливки из формы. Этому было получено экспериментальное подтверждение: стержень, изготовленный из отхода, под безнапорным действием воды быстро увлажнялся и разупрочнялся, возвращаясь в состояние, близкое к состоянию поставки. Заливку образца проводили алюминиевым сплавом АК5М2 при температуре 750 °С.

Заливка расплавом стали 45Л (ГОСТ 977–88) при температуре 1600 °С технологической пробы со стандартным цилиндрическим образцом (диаметром и высотой 50 мм) в ее центре показала возможность применения смесей из шламовых отходов ПВХ и для черных сплавов. При этом эффект гидравлической выбивки формы сохранился.

В итоге можно заключить, что имеются перспективы использования шлама в качестве формообразующего материала. Кроме того, материал обладает хоро-

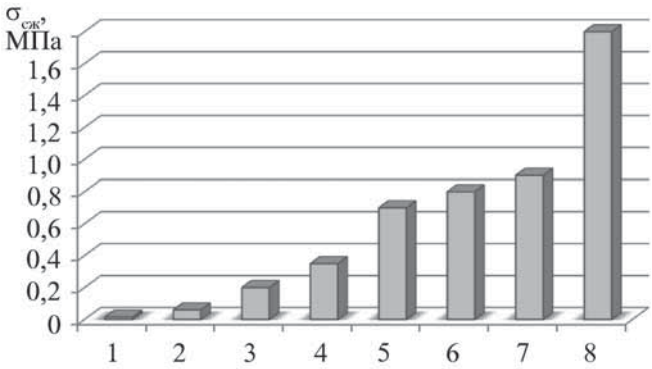



**Рис. 2. Прочность $\sigma_{сж}$ смесей на основе неорганических связующих:**

1 – пластичная самотвердеющая смесь для стержней при стальном и чугунном литье;

2 – облицовочная смесь для формовки по-сырому при массе отливок более 500 кг;

3 – песчано-жидкостекольная облицовочная смесь для форм при стальном литье ($\sigma_{сж}$ указана при их испытаниях на разрыв после продувки $CO_2$);

4 – стержневая смесь на основе жидкого стекла для стального литья;

5 – жидкая песчано-цементная самотвердеющая смесь после выдержки в течение 24 ч;

6 – песчано-масляная стержневая смесь для стальных и чугунных отливок;

7 – сыпучая плакированная песчано-смоляная смесь для стального и чугунного литья;

8 – исследуемый экспериментальный состав

шими экологическими показателями (шлам в исходном состоянии имеет нейтральный уровень pH; при заливке образцов из шлама алюминиевым сплавом не наблюдали интенсивного газовыделения и резких запахов), а его накопление в значительных количествах на полигонах не создает проблем с регулярными поставками потребителю.

Второе возможное направление применения шлама в качестве сырья в литейном производстве – создание фильтрационного слоя гранулированного сухого отхода при разливке алюминиевых сплавов.

Содержащийся в шламе в значительном количестве NaCl, предположительно, позволит снизить температуру кристаллизации силуминов, содержащих более 5 % Si, а также измельчить их структуру. Это приведет к повышению механических характеристик алюминиевых отливок. Для использования в этом направлении шлам должен быть тщательно просушен и гранулирован. Грануляция не представляется сложной задачей, поскольку сам материал при сушке склонен к образованию комков (конгломерации). Однако для обеспечения равномерности гранул сухой материал целесообразно просеять через классификатор для того, чтобы удалить слишком мелкие и слишком крупные частицы.

В лабораторных условиях было проведено исследование по оценке эффективности работы зернистого фильтра, содержащего в качестве фильтрующей загрузки шламовые отходы производства ПВХ на алюминиевом сплаве АК5М2.

Для гарантированного выявления фильтрующего эффекта шихта сплава АК5М2 на 100 % состояла из его возврата в виде сплесков и сливов. Проводили три опытные заливки: 1) без фильтрования (образец 1); 2) с фильтрованием через зернистый фильтр на основе шламовых отходов производства ПВХ (образец 2); 3) с фильтрованием через зернистый фильтр на основе шамотной крошки (образец 3). Залитый образец представлял собой цилиндр диаметром 65 и высотой 170 мм.

Перед исследованием шлам был предварительно подготовлен: высушен, размолот и просеян через сита с размером ячеек 3 и 10 мм (в работе использовалась фракция от 3 до 10 мм). Шамот был подготовлен аналогичным образом.

Исследование макро- и микроструктуры залитых образцов показало существенное снижение пористости в отливке при применении фильтрования расплава АК5М2 через зернистый фильтр на основе шламовых отходов производства ПВХ. Наблюдавшаяся при этом пористость была менее балла 1 по шкале ГОСТ 1583–93 и занимала менее 3 % площади шлифа. В случае с шамотным фильтром, как и в образце без обработки, была выявлена пористость баллом 2, занимающая до 20 % площади шлифа.

Таким образом, результаты экспериментов подтвердили гипотезу о рафинирующем эффекте применения шламовых отходов ПВХ в качестве зернистых фильтров для алюминиевых сплавов.

Еще один рассматриваемый вариант использования шламовых отходов ПВХ в литейно-металлургических технологиях – применение его в качестве футеровочного материала для обмазки ковшей или воротниковой зоны плавильных печей (сопротивления, индукционных тигельных).

Предпосылками для работы в этом направлении явились следующие факты: 1) кварцевый песок является зерновой основой шлама и одновременно основным компонентом кислой футеровки, что свидетельствует о термической стойкости исследуемого материала; 2) учитывая механизм и кинетику нарастания прочности шлама при нагревании, можно ожидать проявления у него достаточной поверхностной прочности, что препятствует преждевременному износу; 3) при влажности 30...40 % в состоянии поставки шлам находится в пастообразном состоянии, что делает его удобным для нанесения.

Для практического подтверждения данного направления в лабораторных условиях была проведена работа по использованию шламовых отходов производства ПВХ в качестве обмазки ковша для разливки алюминиевых сплавов. Для этой цели применяли шлам влажностью 30,5 %, который легко наносился на внутреннюю поверхность ковша. После этого ковш был подвергнут тепловой сушке. Образовавшийся при этом футерованный слой по внешнему виду практически не отличался от традиционных составов (кварцевый песок и огнеупорная глина в соотношении 3:1).

При контакте прогретой обмазки ковша на основе шламовых отходов ПВХ с алюминиевым расплавом визуально был выявлен эффект несмачиваемости. Настыли, образующиеся на холодном ковше, легко удаляются механически без повреждения обмазки. В этой серии экспериментов обнаружено, что обмазка ковша на основе шлама характеризуется объемной прочностью, выдерживая при этом свойственные операциям разливки металла механические воздействия.

Таким образом, физические и химические свойства шламового отхода производства ПВХ делают возможным его использование в литейно-металлургических технологиях в качестве:

- формовочного материала;
- фильтрующего материала;
- футеровочного материала.

В настоящее время исследования по данной тематике продолжаются на кафедре "Литейно-металлургические процессы и сплавы" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Орехова А.И.** Экологические проблемы литейного производства // Экология производства. 2005. № 1. Приложение "Металлургия".

2. **Дибров И.А.** Состояние и перспективные направления развития литейного производства России: тр. X съезда литейщиков России. Казань: "Вертолет", 2011. С. 11–25.

3. **Леушин И.О., Алексеенко А.Л., Грачев А.Н.** Перспективы использования техногенных отходов химической промышленности в литейно-металлургическом производстве машиностроительных предприятий Нижегородского региона // Прогрессивные литейные технологии: тр. VI Междунар. НПК (24–28 октября 2011 г.). М.: НИТУ МИСиС, 2011. С. 182–184.

4. **Леушин И.О., Грачев А.Н., Алексеенко А.Л.** Техногенные отходы производства ПВХ как исходный материал для изготовления литейных форм и стержней // Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2011: materialy VII Miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji. Vol. 54. Techniczne nauki. Przemysl: Nauka i studia, 2011. С. 14–16.

5. **Голотенков О.Н.** Формовочные материалы: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 164 с.

*Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук,*
lmps@nntu.nnov.ru;
*Александр Николаевич Грачев, канд. техн. наук;*
*Анастасия Леонидовна Алексеенко*

УДК 621.74.04

**В.А. Рыбкин, П.А. Чернышев** *(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

# Динамика формирования конечного размера отливок радиоэлектронной промышленности

*Разработана новая методика для расчета размеров оснастки при литье по выплавляемым моделям отливок радиоэлектронной промышленности без механической обработки детали.*

**Ключевые слова:** литье; точность; оснастка.

*The new method to calculate the dimensions of the molds for castings produced by investment casting technology without machine tooling is developed.*

**Keywords:** casting; precision; tooling.

С развитием промышленности происходит модернизация существующих и создание новых машин и приборов, что потребовало разработки деталей сложной конфигурации, к которым предъявляют высокие требования точности их размеров. К таким деталям относятся разнообразные по конструкции волноводные узлы, используемые главным образом в радиоэлектронной промышленности и представляющие тонкостенные детали со сложной конфигурацией внутренних каналов. Основным показателем качества волноводов является точность размеров каналов.

Существующие способы изготовления сложных волноводных узлов – гальванопластика или гибка специальных профилей с последующей пайкой – характеризуются низкой эффективностью. Одним из перспективных процессов изготовления волноводов является литье. Среди многообразия современных способов литья *литье по выплавляемым моделям* (ЛВМ) занимает особое положение в связи с главной особенностью – возможностью изготовления из разнообразных сплавов отливок сложной конфигурации.

При наличии потерь в линии передач СВЧ-энергии при передаче высоких и средних мощностей происходит разогрев линии, а при передаче малых мощностей собственные шумы линии, обусловленные потерями, становятся соизмеримыми с полезным сигналом. Токи СВЧ сосредоточены в поверхностных слоях проводника. Собственные потери устройств определяются свойствами поверхностного слоя металла, определяемого глубиной проникновения СВЧ-тока вследствие поверхностного эффекта.

ЛВМ изготовляют отливки с высокой плотностью металла, параметром шероховатости поверхности *Rz* 20...10 и менее. Однако значительная часть отливок (~78 %) имеет точность размеров по квалитетам 14–17 (ГОСТ 25346–89) [1]. Недостаточная точность размеров отливок снижает эффективность данного способа литья и увеличивает сроки освоения.

Решение задачи повышения точности размеров отливок волноводного класса, изготовленных по выплавляемым моделям, актуально, так как способствует улучшению служебных характеристик радиоэлектронной аппаратуры, является резервом увеличения производительности труда за счет устранения механической обработки сложных по конфигурации каналов волноводов.

Важной задачей является повышение точности размеров отливок из цветных сплавов по выплавляемым моделям деталей радиоаппаратуры и исследование динамики формирования конечного размера данного вида отливок.

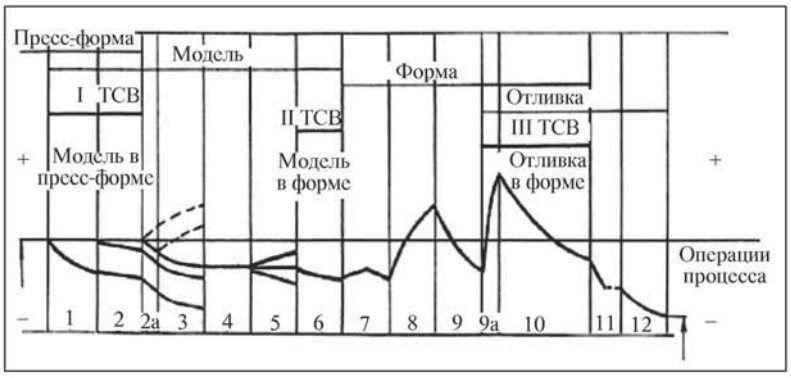



**Рис. 1. Схема формирования размеров отливок ЛВМ**

Исследования показали, что в технологии литья по выплавляемым моделям происходят три термосиловых взаимодействия (ТСВ): "пресс-форма–модель" (I), "модель–форма" (II), "форма–отливка" (III) [2]. Именно эти взаимодействия определяют конечный размер отливки (рис. 1).

Процесс ЛВМ включает в себя два основных этапа: изготовление модели в разъемной пресс-форме и изготовление отливки в неразъемной форме. От 40 до 70 % погрешностей размеров отливок приходится на этап изготовления выплавляемых моделей.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан технологический процесс изготовления моделей с повышенной точностью размеров. Этот способ позволил значительно снизить и стабилизировать усадку моделей. Точность размеров таких моделей соответствует квалитетам 9–11, что значительно повышает точность размеров отливок, изготовленных по выплавляемым моделям.

Однако доля погрешностей размеров отливок, возникающих вследствие неучтенных изменений размеров формы ЛВМ, остается существенной, а причины образования этих погрешностей недостаточно изучены. Отсутствие экспериментальных данных по формированию размеров отливок в формах ЛВМ вызывает затруднения при изготовлении отливок с заданной точностью размеров, правильном назначении размеров рабочей полости пресс-форм.

Для решения этой проблемы необходимо решить научную задачу, заключающуюся в установлении закономерностей влияния физических свойств материалов формы и отливки, технологических режимов прокаливания, заливки, охлаждения отливки на формирование действительных размеров отливок и их отклонений. Для решения данной задачи была разработана программа "Допуск" в объектно-ориентированной среде Delphi, разработан графический интерфейс, представлена наглядная визуализация данных. В основе работы программы лежит двумерная математическая модель, в которой сначала решается тепловая задача формирования отливки, а затем – задача формирования размера.

При производстве литых волноводов чаще используют литье под давлением и по выплавляемым моделям. Литьем под давлением получают волноводы типа уголков, тройников, двойных тройников. Достигаемый параметр шероховатости поверхности волноводов может составлять $Ra = 2{,}5$ мкм. Однако отдельные места поверхности отливок не удовлетворяют требованиям из-за специфического дефекта – "мороза" [3]. К недостаткам этого способа литья также следует отнести ограничение по сложности конфигурации отливок, наличие пористости, невозможность изготовления отливок волноводов без уклонов по внутреннему каналу.

Все это ограничивает область применения литья под давлением. Способ ЛВМ позволяет изготовлять отливки с высокой плотностью металла, малой толщиной стенок от 1 до 2 мм, параметром шероховатости поверхности $Ra = 2{,}5$ мкм, точностью размеров по квалитетам 12–13, а также отливки, обладающие специальными свойствами (прочностью, вакуумплотностью, высокой электропроводностью и т.д.).

В настоящее время в промышленности применяют два варианта технологического процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям: литье в гипсовые (блочные) формы и литье в неразъемные формы. Однако эти процессы в существующем виде не полностью удовлетворяют требованиям достижения высокой точности размеров отливок. В наибольшей степени это относится к варианту литья в гипсовые формы [4].

Действительная точность размеров отливок изменяется в широких пределах квалитета 12–17, при этом только 6 % отливок изготовляют по квалитету 12.

Таким образом, возникающие при литье проблемы обеспечения точности можно свести к следующим:

- обеспечение точности отклонения канала;
- решение теплосиловой задачи взаимодействия моделей "отливка–форма", "форма–расплав" для установления необходимых размеров;
- получение отливки, удовлетворяющей предъявленным требованиям без дорнирования, хонингования или калибровки размера канала.

Этапы работы с программой начинаются с ввода всех переменных программы либо с выбора ввода данных по умолчанию, после ввода всех необходимых параметров можно запустить процедуру расчетов. В любой момент можно сбросить все данные программы, т.е. перезапустить ее или выйти, используя панель управления.

После перехода к расчетам на экране высвечиваются конечный размер отверстия, который будет использован для дальнейших расчетов, и количество получившихся точек.

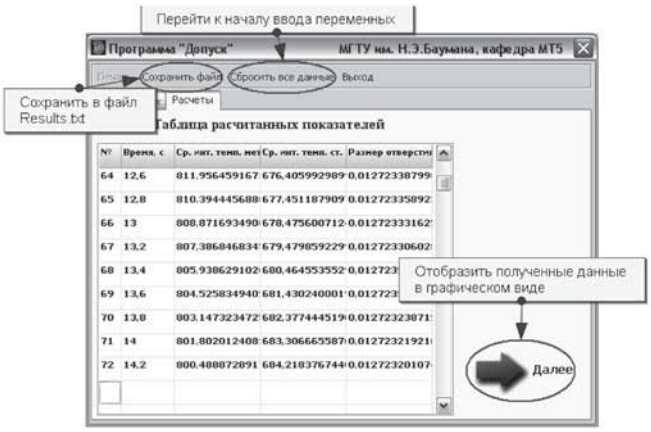



**Рис. 2. Результаты расчета**

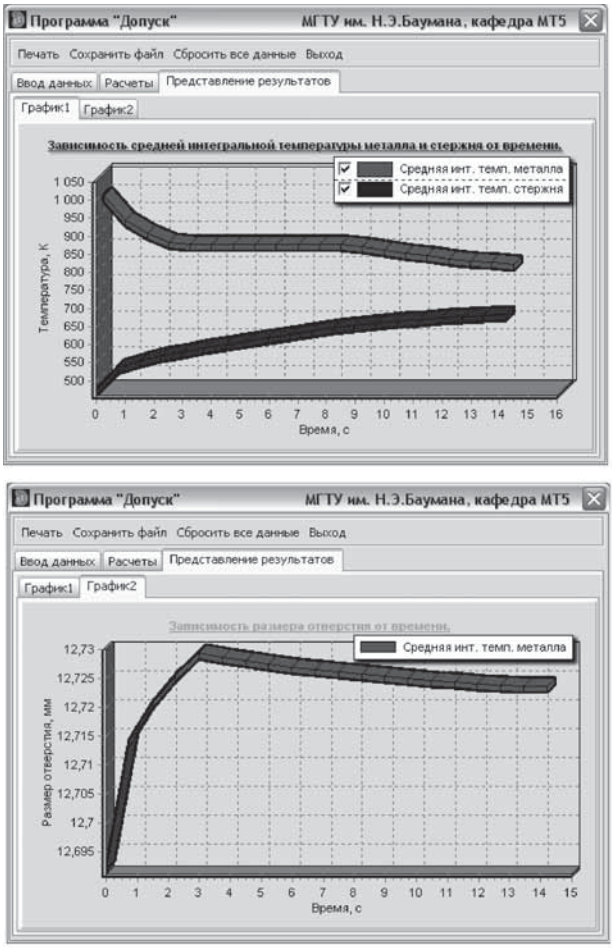



**Рис. 3. Графические изображения результатов расчета**

Затем полученные расчеты можно сохранить (рис. 2) в файл Results.txt в корень папки с программой, в котором будут содержаться все данные, а также число сохранений.

После просмотра численных результатов строятся графики (рис. 3).

Результатом работы программы является конечный размер отливки после охлаждения, учитывая который можно определить необходимый размер пресс-формы в соответствии с конструкторскими требованиями по точности. Программа имеет широкое применение и может быть использована для расчета отверстий аналогичной простой конфигурации из любых сплавов для любого метода литья.

С помощью программы можно рассчитать заданный размер отливки после затвердевания и усадки и на основании этих данных определить номинальный размер детали и оптимальное отклонение размера канала. Однако, даже зная необходимый размер пресс-формы, необходимо учитывать содержание воздуха в моделях и температурные режимы. Только в таком случае можно получить волновод, не требующий дорнирования либо калибровки размера канала.

Таким образом, основными преимуществами при работе с программой "Допуск" являются:

- возможность расчета необходимого размера канала в пресс-форме для изготовления модели;
- наглядное представление теплового взаимодействия формы, стержня и расплава;
- возможность проверки полученных размеров, контроля и исправления технологических ошибок на этапе проектирования;
- возможность определения номинального размера детали и оптимального отклонения размера канала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Репях С.И.** Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006.

2. **Баландин Г.Ф.** Теория формирования отливки. Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки: учеб. для вузов М.: МГТУ, 1998.

3. **Трухов А.П., Маляров А.И.** Литейные сплавы и плавка. М.: Академия, 2004.

4. **Campbell J.** The new metallurgy of cast metals: 2 ed. Elsevier Ltd., 2003.

*Валерий Аверьянович Рыбкин, д-р техн. наук;*
*Павел Алексеевич Чернышев,*
lvm_reseach@mail.ru

УДК 621.791.927.5:537.63

**В.А. Лебедев, И.В. Лендел**
*(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)*

# Управление импульсным движением электродной проволоки при механизированной сварке за счет изменения шага подачи

*Рассмотрены вопросы, связанные с импульсной подачей электродной проволоки при дуговой механизированной сварке в среде защитных газов. Показано, что импульсный алгоритм подачи проволоки с управляемыми параметрами позволяет оказывать существенное влияние на сварочный процесс, улучшить его характеристики. Выявлено, что новые системы импульсной подачи, позволяющие регулировать шаг подачи, являются более эффективными в сравнении с известными системами. Представлены результаты экспериментального исследования процесса сварки с управляемой импульсной подачей за счет изменения шага подачи.*

**Ключевые слова:** дуговая механизированная сварка; импульсная подача; новый привод; импульсный механизм подачи; режимы; оценка.

*The problems associated with pulsed wire feed in arc mechanized welding in shielding gases are considered. It is shown that the pulse wire algorithm with controllable parameters can have significant effects on the welding process, to improve its performance. It is revealed that the new systems pulsed feed to regulate the feed step, are more effective in comparison with known systems. Experimental results of the welding process with controlled pulsed feed by changing the pitch feed are presented.*

**Keywords:** arc mechanized welding; pulse feed; new drive; pulse feeder; modes; score.

Постоянное повышение наукоемкости сварочного производства улучшает качество продукции, ее эффективность и конкурентоспособность. Сварку применяют для неразъемного соединения широкой гаммы металлических, неметаллических и композиционных конструкционных материалов в обычных условиях земной атмосферы, Мировом океане и космосе. Объемы производства сварных конструкций во всем мире составляют сотни миллионов тонн [1].

В настоящее время дуговая механизированная сварка плавящейся электродной проволокой в защитных газах получила широкое распространение и, по всей вероятности, в ближайшем будущем ей не будет альтернативы. Такая тенденция обусловлена относительной простотой, гибкостью и универсальностью оборудования при сварке металлоконструкций различного назначения из углеродистых и низколегированных сталей, высокой производительностью, возможностью непосредственного визуального контроля над процессом формирования шва и наблюдения за дугой, а также низкой стоимостью выполнения работ [2].

Однако дуговая механизированная сварка в углекислом газе имеет ряд недостатков: повышенное разбрызгивание и потери электродного металла, не всегда качественное формирование шва с повышенным усилением и резкими переходами к основному металлу, относительно глубокое проплавление свариваемого металла, а также ограниченная возможность сварки металлов малых толщин (3...5 мм) и др.

Специалистами, занимающимися разработкой и организацией сварочного процесса, отмечено, что увеличение темпов монтажа, снижение себестоимости сварочных работ при обеспечении требуемого уровня качества и эксплуатационных свойств сварных соединений возможно при освоении новых высокопроизводительных способов механизированной сварки в $CO_2$ и газовых смесях [3, 4].

Одним из таких способов является сварка с импульсной подачей электродной проволоки. Это эффективное направление совершенствования механизированных дуговых процессов сварки и наплавки, которое реализует целенаправленное периодическое изменение скорости подачи электродной проволоки по законам, которые обеспечивают принудительный отрыв и перенос капель расплавленного электродного металла в сварочную ванну или их управляемый перенос в режиме коротких замыканий дугового промежутка.

Сущность процессов дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки заключается в управлении их характеристиками за счет использования дополнительных инерционных сил, которые при приложении к капле расплавленного электродного металла могут существенным образом изменить характер плавления проволоки и переноса расплавленного электродного металла.

Благодаря научным трудам Н.М. Воропая, В.Н. Бучинского, С.П. Ковешникова и других ученых [4, 5] можно выделить основные преимущества сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки:

1. Возможность регулирования в широких пределах геометрических параметров сварочных швов (валиков).

2. Сварка по повышенным зазорам, а также сварка и наплавка в различных пространственных положениях.

3. Обеспечение измельчения структуры металла сварного шва и валика наплавленного металла.

4. Уменьшение разбрызгивания электродного металла.

5. Повышение стабильности возбуждения дуги и ее горения.

6. Расширение диапазона толщин металла, который сваривается или наплавляется за один проход.

7. Существенное снижение энерго- и ресурсозатрат.

8. Расширение сфер и объектов, где можно применять механизированное дуговое оборудование.

Процесс исследований импульсной подачи проволоки сопровождался проектированием новых экспериментальных образцов механизмов подачи, конструкции которых существенно отличались друг от друга. В качестве генератора импульсов в механизмах подачи применяли различного рода механические преобразователи, электромагниты, электродвигатели и др. [6]. Отдельные из таких механизмов подачи были доведены до промышленных. Однако большого распространения они не получили из-за своих недостатков. Одним из наиболее эффективных и точных регулируемых параметров в таких устройствах является частота импульсов.

Более совершенным устройством импульсной подачи был механизм на основе *квазиволновой передачи* (КВП), в котором имеется возможность регулирования формы движения в импульсе, важного параметра, влияющего на характер переноса капли расплавленного электродного металла. Эта возможность ограничена конструкцией механизма и, кроме этого, механизмам с КВП присущи некоторые другие недостатки, основные из которых следующие: сложность настройки параметров импульсной подачи, инерционность и относительно большие габаритные размеры механизма с ощутимыми вибрациями и шумом при работе, которые при устранении (уравновешивании) требуют дополнительных затрат.

За последнее время в Институте электросварки им. Е.О. Патона разработано несколько вариантов простых (по механической части конструкции), надежных и эффективных механизмов с регулированием параметров импульсов, использование которых позволяет получить управляемую подачу по принципу: один импульс – одна капля с заданными параметрами.

Новой разработкой является механизм импульсной подачи на основе безредукторного, быстродействующего вентильного компьютеризованного электропривода специальной оптимизированной по силовым характеристикам конструкции. На рис. 1 представлен новый, промышленный образец привода механизма импульсной подачи, а его техническая характеристика приведена в табл. 1. Механизм подачи на основе такого электропривода, в отличие от других известных конструкций является полностью управляемым по всем параметрам импульсного перемещения электродной проволоки (шаг, частота, направление движения).

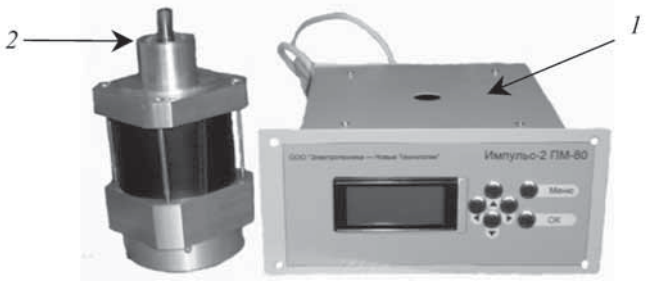



**Рис. 1. Промышленный образец привода механизма импульсной подачи:**
*1* – блок цифрового управления; *2* – вентильный электродвигатель

Основным и определяющим параметром импульсной подачи при механизированной сварке наряду со сварочным напряжением является интегральная скорость перемещения сварочной проволоки, которая задает скорость плавления.

Известно [7], что средняя скорость подачи сварочной проволоки

$$v = f\,(h + T\,v_п)\,, \qquad (1)$$

**1. Техническая характеристика привода механизма импульсной подачи**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Напряжение питания, В | 24 |
| Максимальный потребляемый ток, А | 4 |
| Максимальный момент на валу, Н·м | 1,5 |
| Частота вращения, об/мин: | |
| минимальная | 8,48 |
| максимальная | 485 |
| Скорость подачи*, м/ч: | |
| минимальная | 40 |
| максимальная | 2280 |
| Шаг изменения скорости подачи, м/ч | 5 |
| Частота импульсной подачи, Гц: | |
| минимальная | 1 |
| максимальная | 60 |
| Шаг изменения частоты импульсной подачи, Гц | 1 |
| Габаритные размеры блока управления, мм: | |
| длина | 190 |
| ширина | 118 |
| толщина | 56 |
| Масса блока управления, кг | 1 |
| Масса двигателя, кг | 4 |

*Для ролика диаметром 25 мм

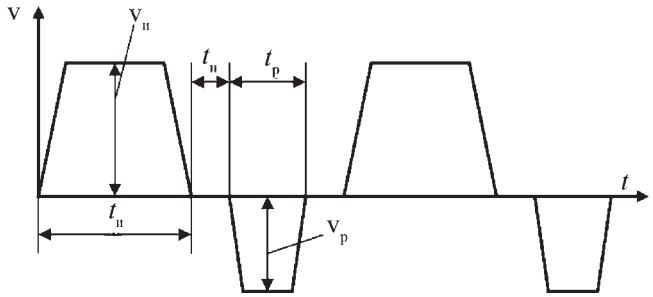



**Рис. 2. Циклограмма импульсной подачи электродной проволоки:**
$t_и$ – длительность импульса; $t_п$ – длительность паузы; $t_р$ – длительность реверса; $v_и$ – скорость в импульсе; $v_р$ – скорость в реверсе

где $f$ – частота следования импульсов подачи; $h$ – шаг подачи проволоки; $T$ – период повторения импульсов подачи; $v_п$ – скорость проволоки на участке паузы. Сумма $h + T v_п$ в выражении (1) обусловливает размер капель электродного металла. При $v_п = 0$ (рис. 2) выражение приобретает вид $v = f h$. Здесь размер капель зависит от шага подачи электрода, а количество переносимых капель – от частоты следования импульсов подачи. При использовании в составе цикла участка реверса (см. рис. 2) из скорости подачи проволоки в направлении сварочной ванны вычитается скорость реверсивной подачи $v_р$.

В первых разработках вентильных электроприводов и механизмов на их основе при настройке параметров импульсной подачи исходили из необходимости установки в цифровом виде значений средней скорости подачи v. При этом также требовалось задание частоты подачи $f$, шаг подачи устанавливался автоматически в соответствии с выражением (1). Однако если решается задача управления импульсной подачей с переносом электродного металла каплями необходимого (оптимального для данного процесса) размера, то проще и эффективнее сделать это изменяя шаг подачи. Исходя из этого, а также упрощая логику наладки параметров импульсной подачи, пользователь нового привода подачи (1) имеет возможность задавать размер капли напрямую через шаг подачи.

Технические характеристики нового электропривода позволяют обеспечивать шаг подачи в диапазоне от десятой доли миллиметра до сотен миллиметров, что позволяет реализовывать процессы с управляемым импульсным перемещением и различные варианты сварки модулированным током. В меню программы импульсного цикла сварки шаг подачи ограничен диапазоном 0,1...10 мм с дискретностью ввода 0,1 мм.

Импульсный механизм подачи на базе вентильного привода, показанного на рис. 1, обеспечивает следующие алгоритмы движения ролика–проволоки:

1) конвенциальное движение;

**Рис. 3. Полуавтомат дуговой сварки ПДГ-351 с механизмом подачи на базе вентильного привода Импульс-2 ПМ-80**

2) импульсное движение в форме, идеализированно представленной на рис. 2, с возможностью реализовывать этот алгоритм полностью или фрагментарно, например, исключить реверс, а также регулировать любой из параметров, обозначенных на рис. 2.

При приемочных испытаниях привода на предприятии-изготовителе использовали полуавтомат дуговой сварки ПДГ-351 (рис. 3), механизм подачи которого был оборудован вентильным приводом (см. рис. 1).

Валики наплавляли в полуавтоматическом режиме сварщиком-экспертом в среде углекислого газа. Полярность – обратная. Напряжение сварки – 22,5 В. Сварочная проволока Св-08Г2С (омедненная) диаметром 1,2 мм. Наплавку проводили на стальную пластину из Ст3 толщиной 6 мм. Также задавали скорость подачи v, шаг подачи (для режима с реверсом $h_и$ – шаг в импульсе, $h_р$ – шаг в реверсе), скважность $S$ и частоту импульсов $f$ (табл. 2, 3).

Из табл. 2 и 3 видно, что механизм импульсной подачи испытывали при конвенциальной подаче электродной проволоки (режимы № 1, 7, 10 и др.), импульсной подаче с заданием шага подачи косвенно, через скорость и частоту импульсов (режимы № 2, 3 и

**2. Режимы испытаний с постоянной и импульсной (без участка реверсирования) подачей электродной проволоки**

| Номер шва (рис. 4) | V, м/ч | $h$, мм | $S$ | $f$, Гц | Номер осциллограммы (рис. 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 220 | – | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 440 | – | 2 | 40 | 2 |
| 3 | 660 | – | 3 | 40 | 3 |
| 4 | – | 1,8 | 2 | 40 | 4 |
| 5 | – | 2,4 | 2 | 40 | 5 |
| 6 | – | 1,2 | 2 | 30 | 6 |
| 7 | 175 | – | 1 | 1 | 7 |
| 8 | – | 1,2 | 2 | 40 | 8 |
| 9 | – | 1,2 | 2 | 50 | 9 |
| 10 | 215 | – | 1 | 1 | 10 |
| 11 | – | 2,0 | 2 | 30 | 11 |
| 12 | – | 2,0 | 3 | 30 | 12 |

**3. Режимы испытаний с реверсом электродной проволоки**

| Номер шва (рис. 6) | $h_и$, мм | $h_р$, мм | $S$ | $f$, Гц | Номер осциллограммы (рис. 7) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,0 | 0,8 | 2 | 40 | 1 |
| 2 | 2,0 | 0,8 | 2 | 50 | 2 |

др.) и импульсной подаче с заданием шага подачи напрямую и автоматическим пересчетом скорости подачи в импульсе (режимы № 4, 5, 6 и др.). Эти режимы отрабатывались автономно, т.е. привод генерирует

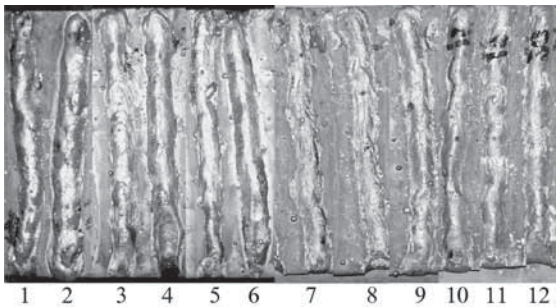



**Рис. 4. Внешний вид наплавленных валиков согласно данным табл. 2**

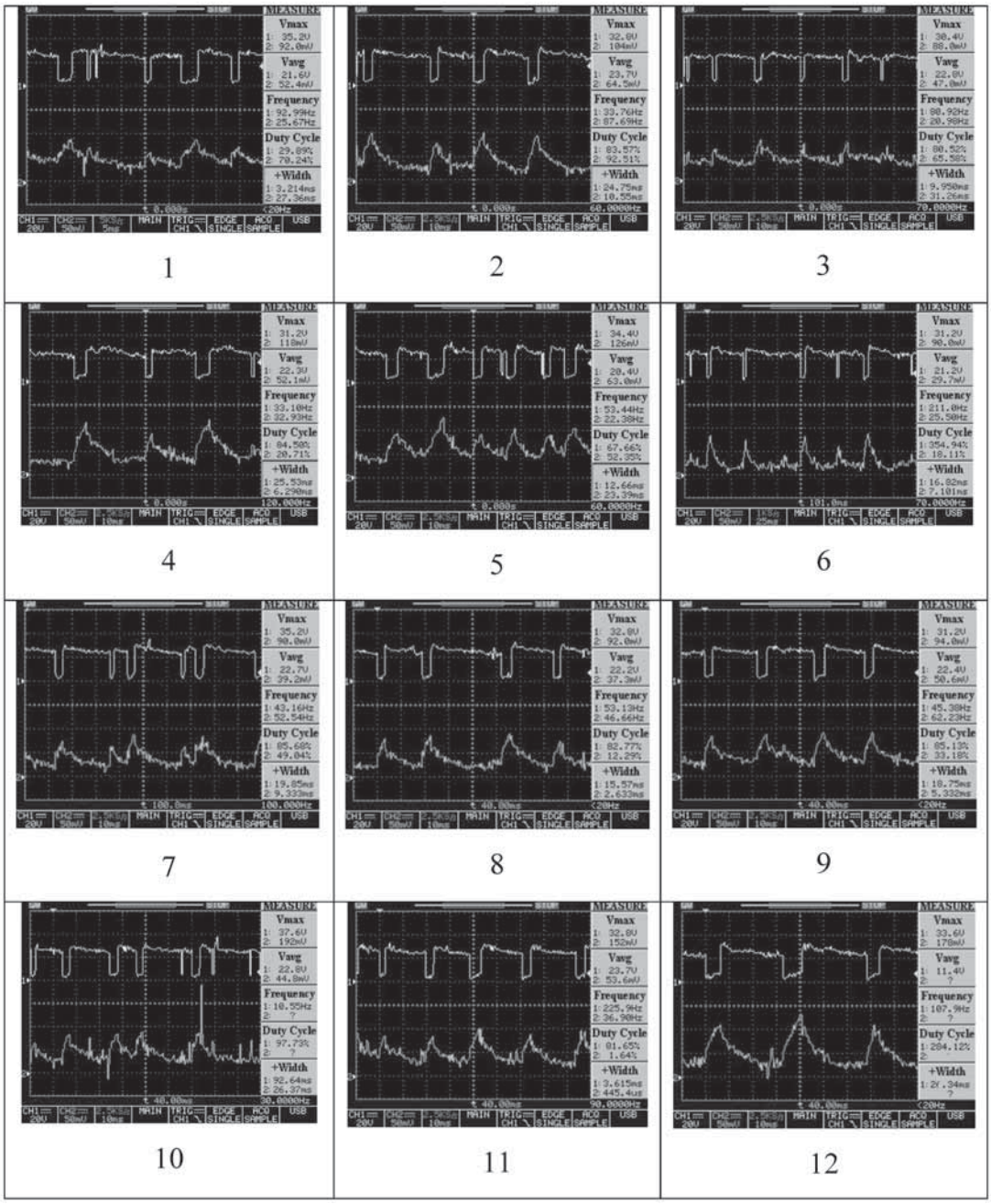



**Рис. 5. Осциллограммы напряжения (канал 1) и тока (канал 2) для режимов с конвенциальной и импульсной подачей электродной проволоки**

**4. Экспертные оценки в баллах, выставленные наплавленным валикам**

| Номер шва | Показатель сварочных свойств | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Начальное зажигание дуги | Стабильность процесса сварки | Разбрызгивание металла | Качество формирования шва |
| 1 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 2 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 5 | 4 | 5 | 4 | 4 |
| 6 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 7 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| 8 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 9 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| 10 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| 11 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 12 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| **Режимы с реверсом** | | | | |
| 1 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 2 | 5 | 5 | 4 | 4 |

импульсы согласно введенной в него программе, но также вентильный привод может работать как ведомый и отрабатывать импульсный алгоритм работы внешнего ведущего устройства (например, импульсного источника сварочного тока).

Все валики (рис. 4, 6), режимы которых указаны в табл. 2, 3, получили качественную оценку, им выставлен балл по дифференциальному методу согласно РД 03-614–03. Стабильность процесса сварки оценивали по осциллограммам напряжения и тока (см. рис. 5, 7), результаты занесены в табл. 4.

Выставленные баллы показывают преимущество импульсной подачи над конвенциальной. Использование в импульсном цикле реверса положительно влияет на сварочные свойства.

1 2

**Рис. 6. Внешний вид наплавленных валиков согласно данным табл. 3**

## Выводы

1. Испытания полуавтомата с новым механизмом подачи показали, что управление импульсным движением электродной проволоки за счет изменения шага подачи – это эффективный инструмент влияния на формирование сварного соединения при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка в углекислом газе.

2. Одним из основных эффектов, выявленных при сварке с регулируемой импульсной подачей электродной проволоки, является существенное расширение диапазона устойчивых режимов процесса, что можно объяснить дозированием капель электродного металла, переходящего в ванну при каждом импульсе, величиной шага подачи.

3. Возможность применения широкого диапазона напряжений сварки при фиксированном значении тока позволяет в ряде случаев упростить сварочное оборудование, в частности, регулирование и наладку.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Патон Б.Е.** Проблемы сварки на рубеже веков // Сварка и родственные технологии – в 21 век: сб. тр. Междунар. конф. 1998. С. 5–12.

2. **Патон Б.Е., Сараев Ю.Н., Лебедев В.А.** Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы для молодых ученых. Юрга: ЮТИ ТПУ, 20–21 мая 2010. Томск: Изд. ТПУ, 2010. С. 15–22.

3. **Патон Б.Е.** Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автоматическая сварка. 2003. № 10, 11. С. 7–13.

4. **Анализ** технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б.Е. Патон, В.А. Лебедев, В.Г. Пичак, С.И. Полосков, Л.Н. Щавелев // Сварочное производство. 2002. № 2. С. 24–31.

5. **Лебедев В.А.** Особенности сварки сталей с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2007. № 8. С. 30–35.

6. **Лебедев В.А., Гедрович А.Н.** Техника и технология дуговой сварки и наплавки (нестационарные процессы и режимы работы). Луганск: Ноулидж, 2010. 255 с.

7. **Воропай Н.М.** Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Автоматическая сварка. 1996. № 10. С. 3–9.

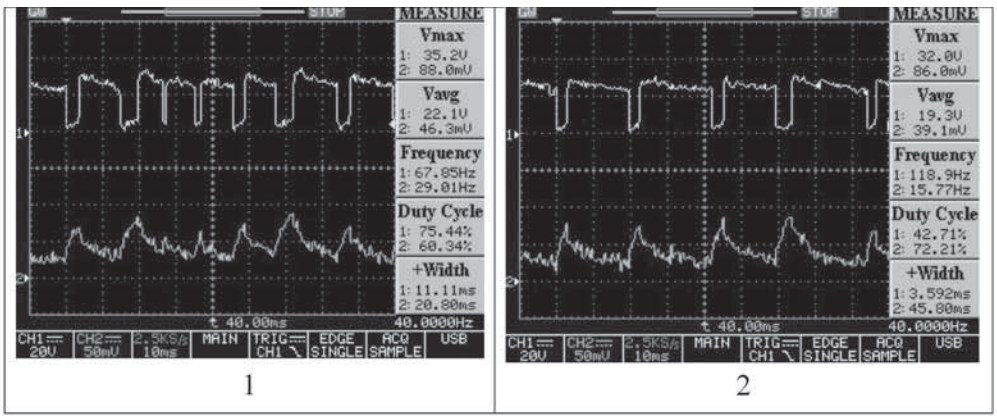




**Рис. 7. Осциллограммы напряжения (канал 1) и тока (канал 2) для режимов с реверсом электродной проволоки**


*Владимир Александрович Лебедев, д-р техн. наук,* lebedevvladimir@ukr.net; *Иван Владимирович Лендел*

УДК 621.37:621.9:621.7

**В.А. Лопота, Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, В.В. Сомонов, М.В. Кузнецов**
*(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)*

# Перспективы внедрения волоконных лазеров для лазерной термообработки черных металлов

*Исследована закалка сталей излучением волоконного лазера. Выявлено повышение производительности процесса лазерной закалки за счет внедрения волоконных лазеров взамен $CO_2$ благодаря увеличению коэффициента поглощения лазерного излучения и исключению необходимости использования поглощающих покрытий. Изучена структура закаленного слоя в сравнении со структурой, полученной на $CO_2$-лазере. Показаны практические результаты закалки волоконным лазером.*

**Ключевые слова:** лазерная обработка; волоконные лазеры; термическая обработка; микроструктура; механические свойства.

*Hardening of steel by the radiation with fiber laser is investigated. Increase in the productivity of laser hardening process due to the implementation of fiber lasers instead of $CO_2$ because of the rise of the absorption coefficient of laser radiation and exclusion of the necessity for using of absorbing coatings is revealed. The structure of the hardened layer in comparison with the structure obtained in the $CO_2$ laser is studied. The practical results of hardening with fiber laser are shown.*

**Keywords:** laser treatment; fiber lasers; heat treatment; microstructure; mechanical properties.

Основной целью лазерного термического упрочнения сплавов является повышение износостойкости деталей, работающих в условиях трения. Уменьшение износа происходит за счет получения высокодисперсной структуры и, как следствие, увеличения твердости и несущих свойств поверхности [1].

Лазерная закалка сталей по аналогии с другими видами закалки заключается в формировании на этапе нагрева аустенитной структуры и ее последующем превращении в мартенсит на этапе охлаждения и обладает следующими преимуществами:

– бесконтактность метода обработки;

– возможность локальной закалки только необходимых мест на изделии;

– отсутствие необходимости применения охлаждающей среды в отличие от закалки в печи или закалки индукционным нагревом;

– полное отсутствие остаточных деформаций;

– гибкость и автоматизация процесса.

В ряду задач закалки одна из самых актуальных – закалка без плавления. Например, для закалки штамповой оснастки недопустимо локальное плавление металла даже в микрозонах [2].

В связи с этим целесообразно провести сравнительный анализ различных типов лазеров, используемых при лазерной закалке.

***$CO_2$-лазеры.*** Для них характерна очень низкая энергетическая эффективность ≈10 %. Коэффициент поглощения металлами излучения данной длины волны не превосходит нескольких процентов, в результате чего полный КПД процесса закалки составляет доли процента. Для повышения КПД закалки применяют разные технологии нанесения поглощающих покрытий на основе оксидов Al и Zn, а также на углеродной основе [3]. Это сильно усложняет процесс и вводит в него множество трудно контролируемых факторов.

***YAG-лазеры.*** При использовании этих лазеров коэффициент поглощения может достигать 10...15 %, однако полный КПД самого лазера составляет не более 2...3 % [4].

***Волоконные лазеры.*** Появление новейших мощных лазерных источников волоконного типа, КПД которых достигает ~25 %, актуализирует вопрос об эффективности их использования для лазерной закалки [5].

**Материал и методика проведения исследований.** Работы выполняли на лазерных технологических комплексах в лаборатории Института лазерных и сварочных технологий и Российско-Германского центра лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В качестве источника лазерного излучения применяли иттербиевые волоконные лазеры ЛС-5 и ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 5 и 15 кВт и длиной волны 1,07 мкм. Излучение транспортировалось по волоконному кабелю к оптической лазерной голове. Для фокусировки излучения использовали головки YW50 фирмы Precitec и BIMO фирмы HighYAG (рис. 1).

Исследовали образцы толщиной 2...40 мм, изготовленные из сталей марок: Ст3, 45, 65Г, 38Х2Н2МА, 40Х, 30Х13.

Обработку осуществляли прямолинейными отдельными участками. Во всех экспериментах лазер применяли в режиме непрерывного излучения. Параметры режима варьировали таким образом, чтобы удельная энергия закалки, вычисляемая как отношение мощности лазерного излучения к произведению ширины закаленного слоя и скорости закалки, изме-

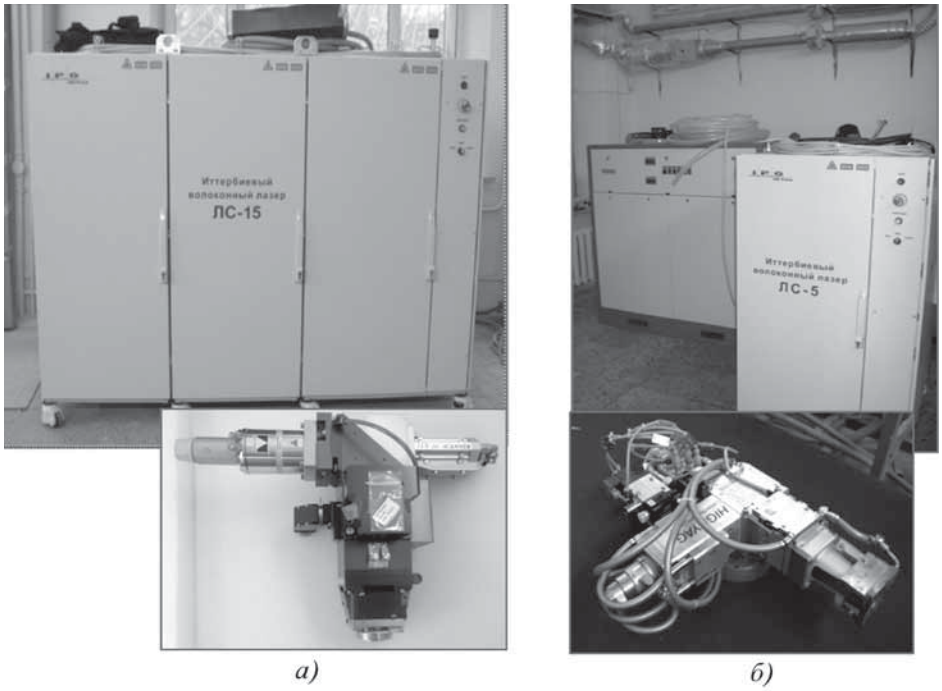
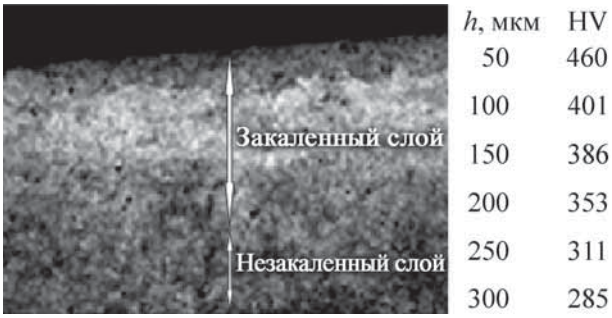



**Рис. 1. Лазеры ЛС-15 (*а*) и ЛС-5 (*б*), лазерные головки YW50 (*а*) и BIMO (*б*)**




| *h*, мкм | HV |
|---|---|
| 50 | 460 |
| 100 | 401 |
| 150 | 386 |
| 200 | 353 |
| 250 | 311 |
| 300 | 285 |

**Рис. 2. Микроструктура и микротвердость HV (при нагрузке 0,981 Н (100 гс) закаленного слоя стали 38Х2Н2МА, полученного при обработке на волоконном иттербиевом лазере ЛС-5. Толщина закаленного слоя 200 мкм**

нялась от 1,75 до 6,4 Дж/мм$^2$. Для сравнения, по данным [3], при обработке на $CO_2$-лазере требуется более высокая удельная энергия закалки от 13,3 до 33,1 Дж/мм$^2$.

Из обработанных образцов, прошедших визуальный контроль на отсутствие оплавления или растрескивания поверхности, изготовляли металлографические шлифы. Используя оптический микроскоп Neophot-21, определяли структурные составляющие, ширину и глубину закаленного слоя. Микротвердость закаленного слоя, переходного слоя и зоны основного металла измеряли на микротвердомере ПМТ-3.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Исследования показали, что после лазерной обработки глубина получаемого закаленного слоя сталей изменялась от 100 до 300 мкм. При этом увеличение микротвердости составляло 1,2–1,7 раза. Скорость закалки достигала 3 м/мин. Это стало возможным благодаря большему эффективному коэффициенту поглощения у волоконных лазеров, чем у $CO_2$-лазеров. При закалке волоконными лазерами отсутствует необходимость нанесения поглощающих покрытий, что дополнительно снижает стоимость процесса и делает его экологически чистым.

Металлографические исследования показали, что микроструктура закаленного слоя сталей, выполненного на ЛС-5, однородная и представляет собой мелкодисперсный мартенсит. В структуре сталей в этом случае полностью отсутствует переходная зона. По данным [2, 4], при обработке на $CO_2$-лазере в структуре сталей присутствует переходная зона. Измеренные значения микротвердости закаленного слоя несколько выше, чем при закалке $CO_2$-лазером. Микроструктура закаленного слоя и значения микротвердости стали марки 38Х2Н2МА приведены на рис. 2.

Ряд промышленных изделий, закаленных с помощью волоконного лазера, представлен на рис. 3.

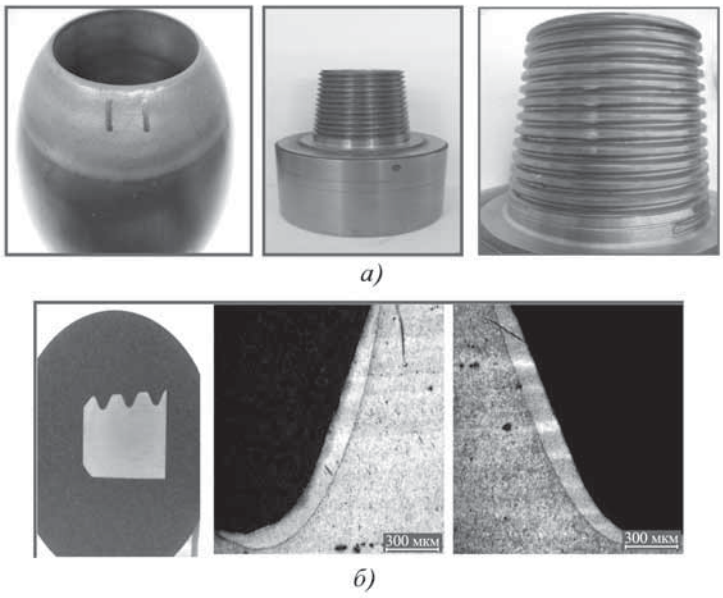



**Рис. 3. Изделия, закаленные с использованием волоконного лазера ЛС-5 (*а*, *б*), и микроструктура зуба зубчатой планки с закаленным слоем**

**Заключение.** Тестирование процесса закалки металлов излучением волоконного лазера показало, что общая эффективность процесса (как отношение производительности к затраченной лучевой мощности) даже без использования поглощающих покрытий в несколько раз превосходит значения эффективности процесса для $CO_2$-лазеров, приведенные в [2, 4].

Применение лазерной закалки стальных изделий волоконными лазерами позволяет получать высокую поверхностную твердость при сохранении достаточной вязкости сердцевины. Структура закаленного слоя однородная и представляет собой мелкодисперсный мартенсит. Переходная зона в структуре закаленных сталей полностью отсутствует.

Необходимая удельная энергия процесса закалки при использовании волоконных лазеров в несколько раз меньше по сравнению с $CO_2$-лазерами. Это значительно повышает его коммерческую конкурентоспособность. Кроме того, учитывая доставку излучения по оптическому волокну и исключение нанесения поглощающих покрытий на поверхность обрабатываемых стальных изделий, этот процесс можно отнести к экологически чистым и полностью контролируемым.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Веселовский В.Б., Губин А.И.** Математическое моделирование лазерного термического упрочнения без плавления поверхности // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. М.: Металлургия, 2008. 134 с.
2. **Попов В.О.** Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и $CO_2$-лазеров // Фотоника. 2009. № 4. С. 32–37.
3. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.** Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 64 с.
4. **Скрипченко А.И., Медвецкий В.М., Попов В.О.** Так закалялась сталь, или тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров // РИТМ. 2007. № 29. С. 16–19.
5. **Цимбал А.Л.** Лазерная закалка стали. СПб.: СПБГУ ИТМО, 2010. 55 с.



*Виталий Александрович Лопота, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук;*
*Глеб Андреевич Туричин, д-р техн. наук,* Gleb@ltc.ru;
*Игорь Александрович Цибульский, канд. техн. наук;*
*Владислав Валерьевич Сомонов;*
*Михаил Валерьевич Кузнецов*

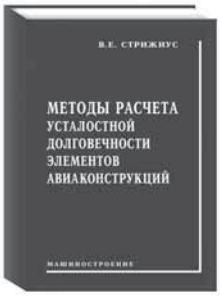


ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАКОНСТРУКЦИЙ**

**В.Е. Стрижиус**

2012 г. Объем 272 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-94275-652-9 Цена 400 р.




Изложены методы и процедуры, позволяющие выполнять инженерные расчеты усталостной долговечности типовых конструктивных элементов самолета на этапах эскизного и рабочего проектирования.

Предлагаемые методы синтезируют наиболее апробированные теоретические и практические положения ряда известных отечественных и зарубежных методов расчета усталостной долговечности элементов авиационных конструкций и позволяют значительно упростить расчеты и обеспечить их приемлемую точность.

При разработке методов и процедур использованы, в частности, некоторые положения методов и процедур расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций фирм Boeing и Lockheed, представленные в открытых публикациях (на английском языке) бывшего главного инженера испытательных лабораторий фирмы Boeing Ульфа Горансона (Ulf Goranson) и бывшего старшего инженера-исследователя фирмы Lockheed Майкла Ниу (Michael Niu).

Для инженеров ОКБ и научных работников НИИ, занимающихся практическими расчетами усталостной долговечности элементов авиационных конструкций, может быть также полезна студентам и аспирантам авиационных вузов.

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

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

УДК 620.170

**А.И. Потапов** *(Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург),*
**С.В. Харитонин** *(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)*

# Сопротивление деформации титановых сплавов при температурах теплой и горячей обработки давлением

*Представлены результаты экспериментов по определению сопротивления деформации титановых сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ6 и ВТ20 в зависимости от температуры, степени и скорости деформации.*

**Ключевые слова:** сопротивление деформации; титановые сплавы; упрочнение; температура; степень и скорость деформации; теплая и горячая деформация.

*Results of experiences for determination of titanium alloys flow stress in dependence on temperature, degree and velocity of deformation are presented.*

**Keywords:** flow stress; titanium alloys; hardening; temperature; degree and velocity of deformation; warm and hot deformation.

Сопротивление деформации $\sigma_s$ – важнейшая реологическая характеристика металлов и сплавов, широко используемая при решении задач по определению напряженно-деформированного состояния металла и для расчета энергосиловых параметров процессов обработки давлением. Известно, что наиболее достоверные результаты по определению $\sigma_s$ получают осадкой образцов на пластометрах.

В статье приведены результаты исследования сопротивления пластической деформации титановых сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ6 и ВТ20 на кулачковом пластометре, установленном в институте машиноведения УрО РАН. Пластометр позволяет проследить изменения сопротивления деформации в широком диапазоне температур, степеней и скоростей деформации.

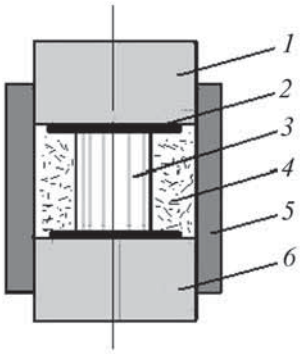



**Рис. 1. Контейнер с образцом для нагрева и испытания:** *1* – верхний боек; *2* – смазка; *3* – образец; *4* – теплоизоляция (каолиновая вата); *5* – контейнер (труба); *6* – нижний боек

В экспериментах использовали образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Перед нагревом их помещали в металлический круглый контейнер (рис. 1) между двумя деформирующими бойками из жаропрочного твердого сплава, а пространство между образцом и внутренней стенкой контейнера заполняли каолиновой ватой, что обеспечивало постоянство температуры образцов в процессе испытания. По данным специально проведенных опытов, это позволяет сохранять температуру образцов в течение 20 с, что вполне достаточно для обеспечения процесса осадки при постоянной температуре.

Нагрев образцов в контейнере осуществляли в электрической печи с карбид-кремниевыми нагревателями в течение 20...40 мин в зависимости от температуры нагрева [1].

Поскольку сопротивление деформации необходимо определять при одноосном напряженном состоянии, т.е. при отсутствии сил трения на контакте, для исключения трения и сведения к минимуму бочкообразования на боковой поверхности образцов использовали эффективные смазки, состав которых зависел от температуры: при 400...700 °С – соль NaCl; при 800...900 °С – смесь NaCl + молотое стекло; при 1000...1200 °С – молотое стекло.

Схема деформирующего узла кулачкового пластометра, на котором проведено исследование, представлена на рис. 2. Пластометр работает следующим образом. От двигателя через редуктор и цепь (или через клиноременную передачу) вращение передается на вал маховика, запасающего кинетическую энергию. Путем включения специальной скоростной муфты

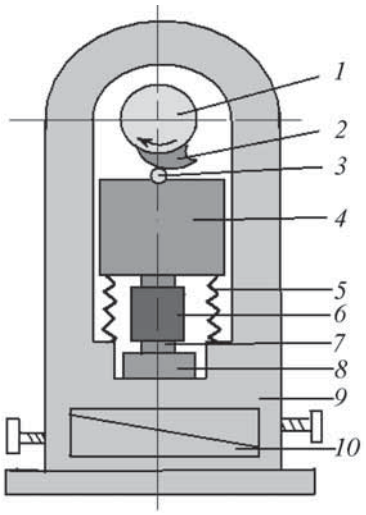



**Рис. 2. Схема деформирующего узла пластометра:**
*1* – кулачковый вал; *2* – профилированный кулачок; *3* – ролик; *4* – ползун; *5* – возвратная пружина; *6* – контейнер с образцом; 7 – нижний боек; *8* – месдоза; *9* – станина пластометра; *10* – клиновое устройство

вращение от него передается кулачковому валу *1*, на котором жестко закреплен кулачок *2* определенного профиля. При повороте вала кулачок через ролик *3* передает поступательное движение ползуну *4*, который через верхний боек деформирует испытуемый образец, установленный в контейнере *6*. Нижний боек *7* опирается на месдозу *8*, установленную на столе пластометра и воспринимающую силу деформации. Величина и скорость обжатия, а также постоянство этой скорости по ходу обжатия определяются профилем кулачка [1].

Поскольку муфта включает кулачковый вал только на один оборот, после осадки образца включается тормоз, и кулачковый вал останавливается в исходном положении. Пружинами *5* ползун также возвращается в исходное положение.

Образцы для испытаний были изготовлены из прокатанных прутков в состоянии поставки. Характеристика исследованных титановых сплавов представлена в таблице, где $T_{п.п}$ – температура полиморфного

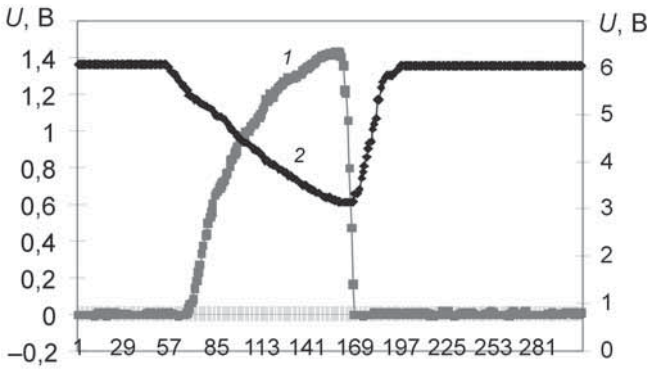



**Рис. 3. Пример компьютерной регистрации процесса осадки образца на пластометре:**
*1* – кривая изменения силы осадки (шкала ординат – слева); *2* – кривая перемещения ползуна (шкала ординат – справа); ось абсцисс – порядковый номер временной точки регистрации

превращения, $T_{рек}$ – температура рекристаллизации сплава.

Испытания проведены в интервале температур теплой (400...800 °С) и горячей (900...1200 °С) деформации. Указанное разделение температур условно, поскольку температура 900 °С примерно соответствует середине интервала температур рекристаллизации. Поэтому деформацию при 900 °С точнее следует назвать полугорячей. Осадку образцов осуществляли со скоростями деформации 0,1; 1; 10 и 50 $с^{-1}$, что позволило проследить влияние скорости деформации на степенное упрочнение сплавов при всех исследованных температурах.

Пластометр оснащен системой сбора и обработки информации на базе ПЭВМ Pentium 3 с быстродействующим АЦП PCI-1713, пакетами GeniDAQ и WinDAQ в ее составе с программным обеспечением GENIE (Advantech). Используемые программные комплексы сбора и регистрации данных осуществляли вывод результатов испытаний в формате Microsoft Excel в виде графиков изменения силы деформации и перемещения ползуна по ходу осадки. Пример такого графика представлен на рис. 3. По специально разработанной программе получали кривые течения (уп-

**Характеристика исследованных титановых сплавов**

| Марка сплава | Группа сплава | Содержание легирующих элементов, % | $T_{п.п}$ | $T_{рек}$ | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | °С | | |
| ВТ3-1 | α+β мартенситного типа | 6 Al; 2,5 Mo; 2 Cr; 0,3 Si; 0,5 Fe | 960...990 | 850...960 | Жаропрочный сплав |
| ВТ8 | | 6,5 Al; 3,3 Mo; 0,3 Si | 980...1020 | 900...980 | |
| ВТ6 | | 6 Al; 4,5 V | 960...1000 | 850...950 | Конструкционный сплав |
| ВТ20 | Псевдо-α | 6 Al; 2 Zr; 1 Mo; 1 V | 980...1020 | 800...950 | Сплав общего назначения |

рочнения) сплавов – кривые изменения сопротивления деформации $\sigma_s$ с увеличением истинной или логарифмической деформации при осадке $e = \ln H_0 / H_i$ ($H_0$, $H_i$ – начальная и текущая высота образца соответственно) при фиксированной температуре и скорости деформации.

Результаты экспериментов – кривые течения (упрочнения) сплавов при температурах теплой деформации приведены на рис. 4, а при температурах горячей деформации – на рис. 5. Отметим, что при высокой скорости деформации ($\xi$ = 50 с$^{-1}$) не удалось получить кривые течения при 400 и 500 °С из-за разрушения образцов уже на начальном этапе осадки.

Из сопоставления и анализа кривых течения следует, что при температурах теплой и полугорячей (при 900 °С) деформации кривые течения для всех сплавов имеют характерный вид с максимумом в некотором интервале степеней деформации $e$. На первом этапе осадки происходит интенсивное упрочнение сплавов, а по достижении максимального значения – разупрочнение. С ростом степени деформации $e$ в дополнение к динамическому возврату и полигонизации начинается процесс динамической рекристаллизации, в результате чего сопротивление деформации с увеличением $e$ снижается, а затем (при больших степенях деформации) может выходить на установившийся уровень.

С повышением температуры максимум на кривых $\sigma_s - e$ и начало разупрочнения смещаются в сторону меньших степеней деформации. Стадия деформационного упрочнения сокращается, а динамическое разупрочнение начинается раньше. Если при температурах 400...500 °С разупрочнение начинается при степенях деформации $e$ = 0,35...0,45, то при температурах 700...900 °С – при $e$ = 0,1...0,2.

Поскольку в процессе теплой деформации разупрочнение происходит ниже температур рекристаллизации (см. таблицу), это разупрочнение, как было показано выше, может быть обусловлено динамическим возвратом, полигонизацией и динамической рекристаллизацией, а при температуре 900 °С – начавшейся рекристаллизацией обработки. При больших степенях деформации ($e$ = 0,8...1,0) возможна некоторая стабилизация уровня $\sigma_s$, которая в опытах достигалась редко.

С ростом температуры (до температур горячей обработки) упрочнение и, соответственно, разупрочнение происходит менее интенсивно. При температурах 1000...1200 °С некоторое упрочнение заметно лишь на начальном этапе деформации, а затем сплавы ведут себя как жесткопластические среды, без сколько-нибудь существенного изменения $\sigma_s$ во всем интервале степеней деформации (см. рис. 5).

Однако при больших скоростях деформации ($\xi$ = 50 с$^{-1}$) происходит заметное разупрочнение сплавов с увеличением степени деформации. Это обстоятельство можно объяснить тем, что при больших скоростях процесс осадки приближается к адиабатическому, происходит сильный разогрев образцов, чему способствует и малая теплопроводность титановых сплавов. Вследствие разогрева образцов сопротивление деформации сплавов по мере осадки (т.е. по мере все большего разогрева) снижается.

С повышением температуры испытания величина $\sigma_s$ монотонно снижается. Типичный для исследован-

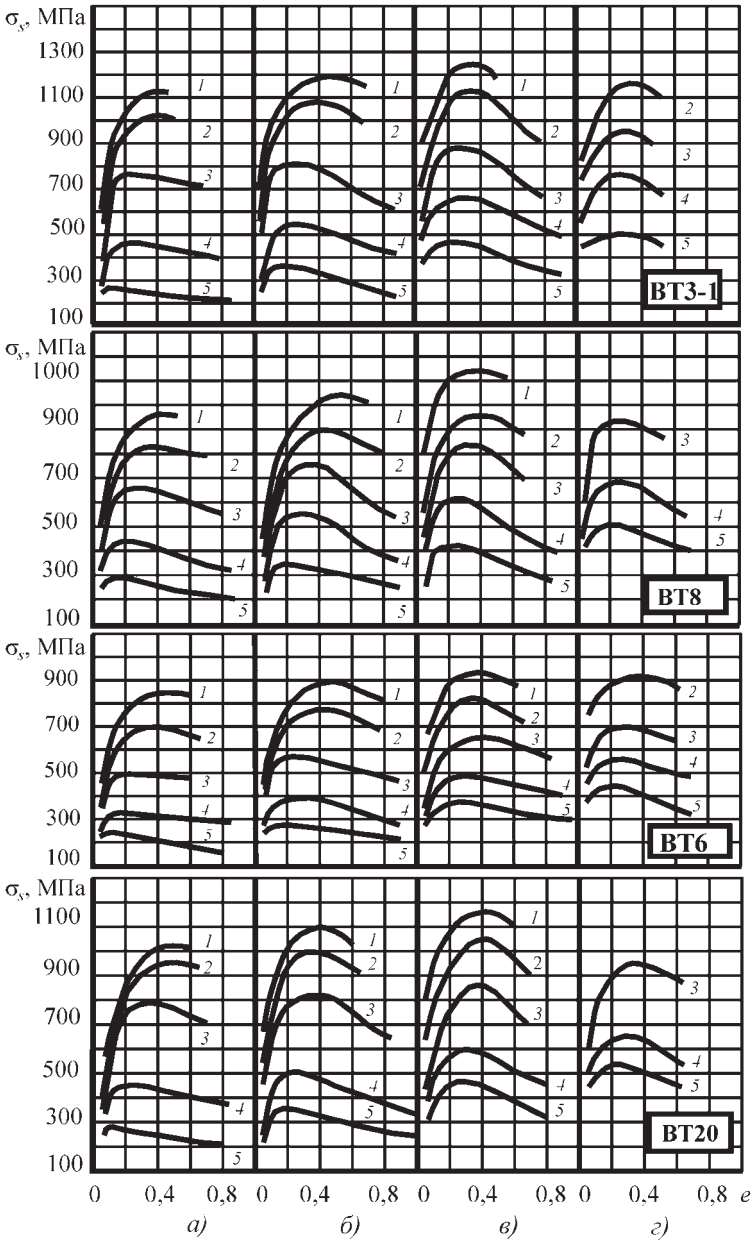



**Рис. 4. Кривые течения титановых сплавов при осадке со скоростями деформации 0,1 (*а*), 1 (*б*), 10 (*в*) и 50 с$^{-1}$ (*г*) при температурах теплой деформации, °С :**
*1* – 400; *2* – 500; *3* – 600; *4* – 700; *5* – 800

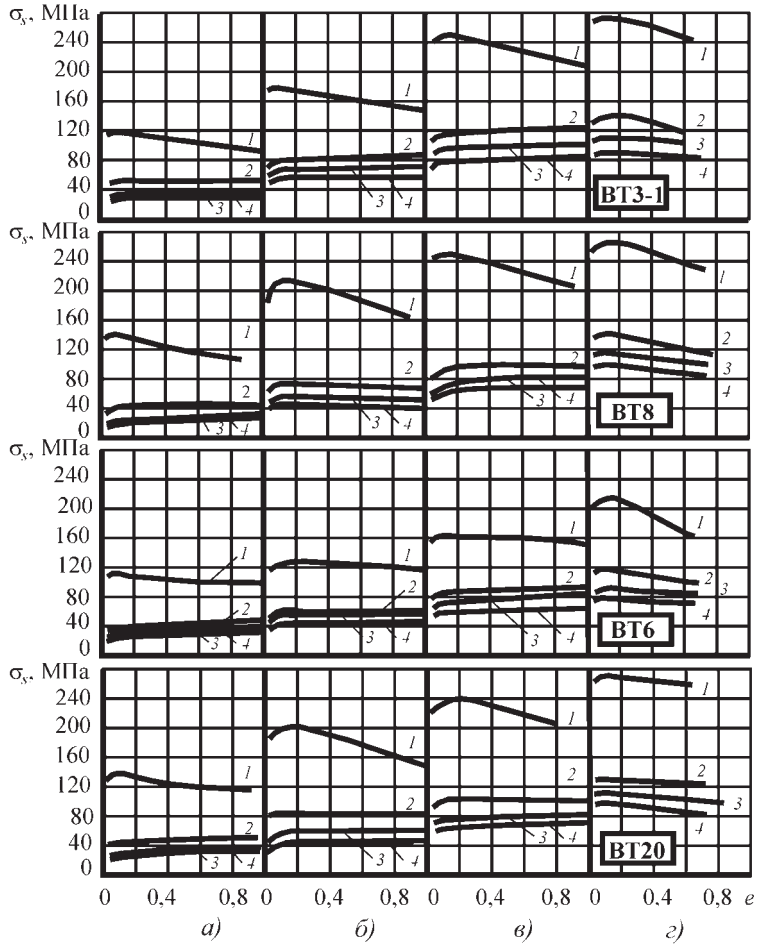



**Рис. 5. Кривые течения титановых сплавов при осадке со скоростями деформации 0,1 (*а*), 1 (*б*), 10 (*в*) и 50 с$^{-1}$ (*г*) при температурах горячей деформации, °С:**
*1* – 900; *2* – 1000; *3* – 1100; *4* – 1200

ных сплавов вид кривых $\sigma_s - T$ представлен на рис. 6. Монотонность несколько нарушается в интервале температур рекристаллизации и полиморфного превращения, по окончании которых уровень сопротивления деформации достигает минимальных значений и в определенной мере стабилизируется (изменяется незначительно).

Данные позволяют сделать вывод, что силовые параметры процессов теплой, полугорячей и горячей ОМД титановых сплавов существенным образом зависят от температуры деформации во всем интервале исследованных температур (400...1200 °С).

Для оценки влияния скорости деформации на величину $\sigma_s$ используем и рассчитаем коэффициент скоростного упрочнения $n$. В интервале изменения скорости деформации $\xi$ от 0,1 до 1 с$^{-1}$ величину $n$ определим как отношение $\sigma_s$ при $\xi = 1$ с$^{-1}$ к $\sigma_s$ при $\xi = 0{,}1$ с$^{-1}$ или $n_1 = \sigma_s(1) / \sigma_s(0{,}1)$, в интервале изменения скорости от 0,1 до 10 с$^{-1}$ как $n_2 = \sigma_s(10) / \sigma_s(0{,}01)$ и в интервале изменения скорости от 0,1 до 50 с$^{-1}$ как $n_3 = \sigma_s(50) / \sigma_s(0{,}01)$. Отметим, что и в этом случае взяты максимальные значения сопротивления деформации из кривых течения на рис. 4 и 5, которые, как отмечено выше, имеют место при $e$ = 0,1...0,45 в зависимости от температуры испытания.

Для примера на рис. 7 построены типичные для исследованных сплавов графики изменения скоростных коэффициентов $n_1$, $n_2$ и $n_3$ в зависимости от температуры испытания. Анализ их свидетельствует о том, что изменение уровня $\sigma_s$ с увеличением скорости деформации в исследуемых пределах зависит от температуры испытания.

До температур 600...700 °С влияние скорости деформации незначительно: коэффициент скоростного упрочнения имеет величину, близкую к единице (особенно в интервале малых скоростей).

При дальнейшем повышении температуры вплоть до 1100 °С увеличение скорости приводит к более резкому росту сопротивления деформации: коэффициенты $n_i$ возрастают.

При достижении температуры 1200 °С коэффициенты скоростного упрочнения не изменяются, а остаются на том же уровне. Можно предположить, что при высокой температуре (1200 °С) процессы рекристаллизации происходят настолько быстро, что повышение скорости деформации уже не приводит к возрастанию деформационного упрочнения: оно в значительной мере снимается быстро протекающей рекристаллизацией.

Следует также отметить, что увеличение скорости деформации $\xi$ несколько сдвигает максимум $\sigma_s$ на кривых течения в область больших значений степени деформации, так как при высоких скоростях начало динамической рекристаллизации задерживается, хотя с ростом $\xi$ этот процесс происходит более интенсивно, чем при низких скоростях.

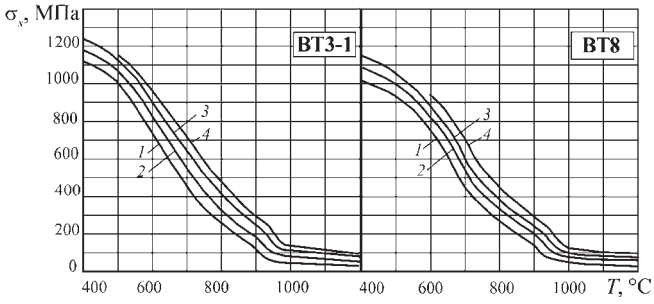



**Рис. 6. Зависимость максимального значения сопротивления деформации титановых сплавов от температуры испытания *T* при скоростях деформации ξ:**
*1* – 0,1 с$^{-1}$; *2* – 1 с$^{-1}$; *3* – 10 с$^{-1}$; *4* – 50 с$^{-1}$

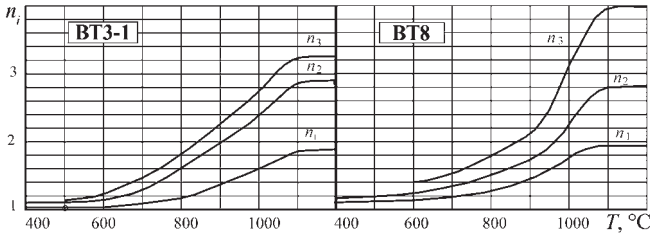



**Рис. 7. Температурная зависимость коэффициентов скоростного упрочнения $n_i$ при увеличении скорости деформации ξ:** $n_1$ – от 0,1 до 1 с$^{-1}$; $n_2$ – от 0,1 до 10 с$^{-1}$; $n_3$ – от 0,1 до 50 с$^{-1}$

## Выводы

1. Установлены закономерности изменения уровня $\sigma_s$ титановых сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ6 и ВТ20 в зависимости от степени $e$, температуры $T$ и скорости ξ деформации.

2. В условиях теплой (400...800 °С) и полугорячей (900 °С) деформации кривые течения $\sigma_s - e$ имеют ярко выраженный максимум уровня $\sigma_s$, который при повышении температуры испытания смещается в сторону меньших значений степени деформации, а при увеличении скорости – в сторону больших значений $e$.

3. При температурах горячей деформации (1000...1200 °С) сплавы ведут себя как жесткопластические среды без существенного изменения $\sigma_s$ с ростом степени деформации. Исключение составляет деформация с высокими скоростями (ξ = 50 с$^{-1}$), при которой наблюдается некоторое разупрочнение сплавов с возрастанием $e$.

4. С повышением температуры $\sigma_s$ всех сплавов снижается и достигает минимальных значений при температурах выше $T_{рек}$ и $T_{п.п}$. В интервале температур рекристаллизации и полиморфного превращения существенного роста уровня $\sigma_s$ не отмечается.

5. Влияние скорости деформации имеет сложный характер и зависит от температуры испытания. При низких температурах (от 400 до 600...700 °С) скоростное упрочнение невелико и резко возрастает с повышением температуры вплоть до 1100 °С. При дальнейшем увеличении температуры до 1200 °С коэффициент скоростного упрочнения не изменяется.

6. Результаты экспериментов по определению сопротивления деформации титановых сплавов могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров обработки давлением в условиях теплой, полугорячей и горячей деформации указанных сплавов в состоянии поставки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

*Алексей Иванович Потапов, канд. техн. наук,*
potapov_ai@list.ru;
*Сергей Васильевич Харитонин, канд. техн. наук*

УДК 67.02

**В.Я. Осадчий, В.Б. Леняшин, Я.О. Князев**
*(Московский государственный университет приборостроения и информатики)*

# Инновационная технология штамповки компрессорных лопаток небольшой длины

*Рассмотрена инновационная технология штамповки компрессорных лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения путем формирования объемов с помощью комбинирования процессов выдавливания и высадки.*

**Ключевые слова:** штамповка; высадка; выдавливание; относительное удлинение; штамповка компрессорных лопаток.

*The innovative technology of compressor blades of small length with significant differences in cross-sectional areas by forming of volumes by combining of extrusion and upsetting is considered.*

**Keywords:** stamping; upsetting; extrusion; elongation; stamping of compressor blades.

В компрессорах высокого давления и реактивных двигателях одной из важных и массовых деталей является компрессорная лопатка, изготовляемая из дорогостоящих титановых сплавов.

Согласно классификации Е.И. Семёнова [1] компрессорные лопатки в зависимости от перепада площадей поперечного сечения можно отнести ко II или III группе поковок, штампуемых на кривошипных прессах. Поэтому в настоящее время на машиностроительных заводах применяют следующие способы штамповки компрессорных лопаток:

- штамповка в один переход или с предварительной осадкой;

• штамповка с предварительной высадкой заготовок на *горизонтально-ковочных машинах* (ГКМ);

• штамповка с предварительной высадкой заготовок на электровысадочных машинах;

• штамповка с предварительной вальцовкой заготовок;

• изотермическая штамповка.

Штамповку в один переход или с предварительной осадкой применяют в случае, когда размеры лопатки малы, а перепад площадей поперечных сечений велик, что затрудняет использование классических заготовительных переходов. Преимуществом данного способа штамповки является то, что, как правило, штамповка проводится с одного нагрева, что позволяет уменьшить глубину альфированного слоя, однако при этом повышается расход металла.

Штамповка с предварительной высадкой на ГКМ в настоящее время является наиболее распространенным способом фасонирования заготовок и позволяет снизить расход металла по сравнению со штамповкой в один переход. Заготовка в один или несколько переходов высаживается на ГКМ, а затем после подогрева штампуется в окончательном штампе.

Электровысадка заготовок позволяет избежать дополнительного нагрева в печи перед фасонированием заготовки, так как нагрев осуществляется непосредственно на электровысадочной машине, кроме того, во время данного процесса нагревается только деформируемая часть заготовки. После высадки фасонированная заготовка передается для окончательной штамповки на пресс.

Вальцовка позволяет распределить объем металла по длине заготовки. При фасонировании заготовок для компрессорных лопаток на вальцах распределение объема заготовки проводится для нескольких поковок сразу.

В процессе изотермической штамповки в заготовке, инструменте и окружающем их ограниченном пространстве создается и постоянно поддерживается температура, обеспечивающая оптимальную пластичность металла обрабатываемой заготовки. Деформирование осуществляется при малых скоростях, поэтому разупрочняющие процессы успевают протекать в его ходе, что повышает технологическую пластичность металла и резко снижает сопротивление пластическому деформированию. Применение изотермической штамповки позволяет получать точные поковки с высоким коэффициентом использования металла.

Однако при изготовлении лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения данные способы применять нецелесообразно по следующим причинам: штамповка в один переход или с предварительной осадкой имеет очень низкий коэффициент использования металла, высадка на ГКМ и в электровысадочной машине ограничена степенью деформации металла и поэтому необходим дополнительный подогрев, а это увеличивает глубину альфированного слоя, также при высадке на ГКМ заготовка может потерять устойчивость, вальцовку осуществить невозможно, так как длина пера слишком мала, а изотермическая штамповка имеет высокую продолжительность процесса.

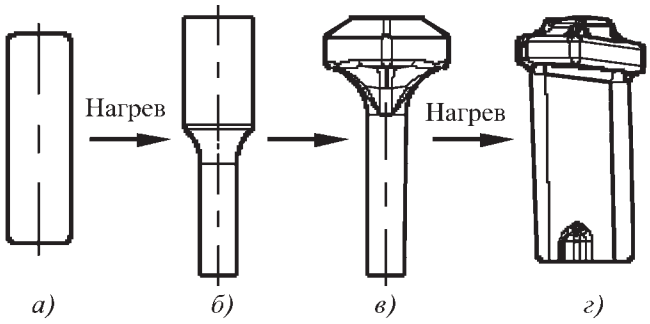



**Рис. 1. Схема штамповки:**
*а* – заготовка; *б* – выдавливание; *в* – высадка; *г* – штамповка в ручье окончательного штампа

Поэтому предложена новая технология изготовления таких лопаток: нагрев, выдавливание стержневой части с площадью, равной максимальной площади поперечного сечения пера поковки лопатки с учетом облоя, высадка замковой части, нагрев и окончательная штамповка в открытом штампе (рис. 1).

Для выбора заготовки необходимо рассчитать размеры по переходам от готовой поковки к заготовке. Так как высадка осуществляется в закрытом штампе с компенсатором, являющимся продолжением стержня (рис. 2), будет происходить удлинение стержня, которое необходимо знать для расчета размеров заготовки.

Авторами статьи выявлена зависимость, связывающая данное удлинение с геометрическими параметрами поковки и коэффициентом трения металла путем моделирования данного процесса в программе QForm.

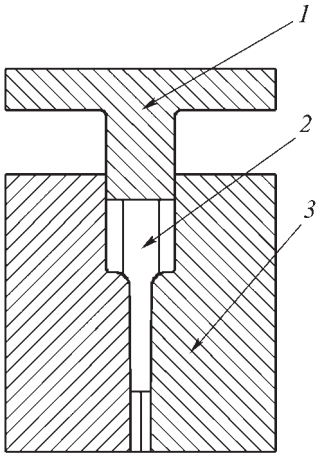



**Рис. 2. Схема процесса высадки в закрытом штампе с компенсатором:**
*1* – пуансон; *2* – предварительно выдавленная заготовка; *3* – разъемная матрица

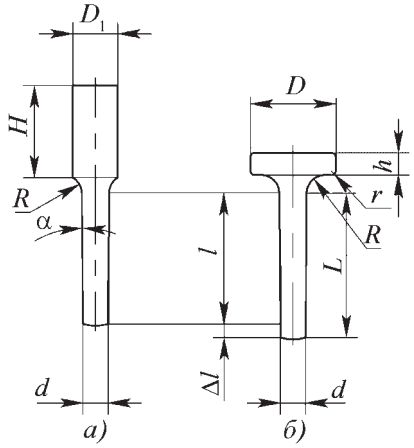



**Рис. 3. Эскиз предварительно выдавленной (*а*) и высаженной заготовки (*б*)**

Исследования показали, что квадратную замковую часть можно заменить осесимметричной, равной по площади, поэтому моделирование проводили в QForm 2D. Механические свойства титановых сплавов были взяты из работы [2]. Эскизы заготовки после выдавливания и высадки представлены на рис. 3.

Получили следующую зависимость:

при $m < 9{,}85$:

$$l = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a};$$

при $m \geq 9{,}85$:

$$l = \frac{L}{1+z},$$

где $m$ – отношение длины стержневой части к диаметру, $m = \frac{l}{d}$; $a = 1 + z - 0{,}046$; $b = 0{,}439\, d\,(1 + z + 1{,}032) - L$; $c = d\,L \cdot 0{,}439$; $z = k_1 - 0{,}007n - k_2\rho - k_3\xi_1 + 0{,}2235\varepsilon_в^3 - 0{,}0734\varepsilon_в^3 + 0{,}0237\varepsilon_в - 0{,}009\alpha - 0{,}044f$; $n$ – относительный диаметр высаженной части, $n = \frac{D^2}{d^2}$; $\rho$ – относительный радиус скругления стержневой части, $\rho = \frac{R}{d}$; $\xi_1$ – относительный радиус скругления дна матрицы, $\xi_1 = \frac{r_1}{d}$; $\varepsilon_в$ – степень деформации при высадке,

**Ограничения и соответствующие им коэффициенты для расчета относительного удлинения**

| Ограничения | $k_1$ | $k_2$ | $k_3$ |
|---|---|---|---|
| $\rho \geq 0{,}89$, $\xi_1 \geq 0{,}157$ | 0,0278 | 0 | 0 |
| $\rho < 0{,}89$, $\xi_1 \geq 0{,}157$ | 0,1458 | 0,135 | 0 |
| $\rho \geq 0{,}89$, $\xi_1 < 0{,}157$ | 0,0767 | 0 | 0,309 |
| $\rho < 0{,}89$, $\xi_1 < 0{,}157$ | 0,1947 | 0,135 | 0,309 |

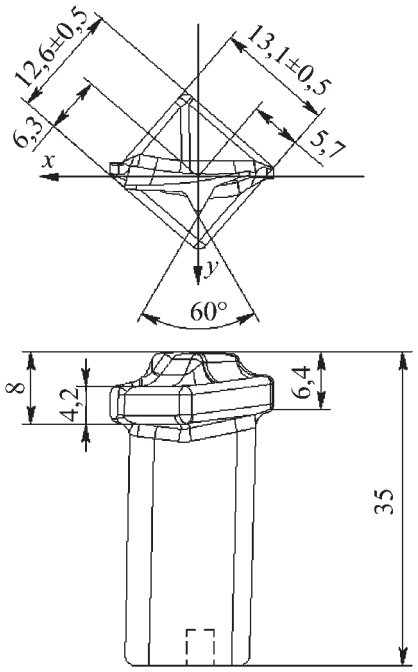



**Рис. 4. Лопатка вертолетного двигателя**

$\varepsilon_в = 1 - \frac{D_1^2}{D^2}$; $\alpha$ – угол наклона стержневой части; $f$ – коэффициент трения; $k_1$, $k_2$, $k_3$ – коэффициенты (см. таблицу).

Рассчитав размеры поковки после выдавливания, можно определить размеры исходной заготовки.

Сравним предложенную технологию с наиболее распространенной технологией производства лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения: штамповка с предварительной осадкой. В качестве примера взята одна из лопаток вертолетного двигателя (рис. 4).

При штамповке с предварительной осадкой необходимо использовать заготовку диаметром 18 мм, длиной 34 мм, а по новой технологии – заготовку диамет-

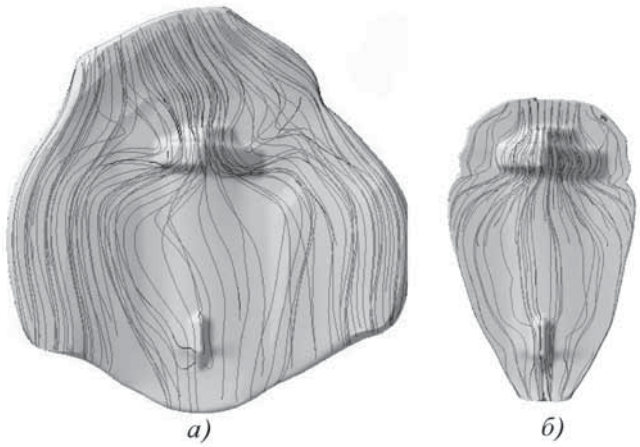



**Рис. 5. Распределение лагранжевых линий в поковке с облоем:** *а* – базовый вариант; *б* – предложенный вариант

ром 9 мм, длиной 30 мм. Также по сравнению с базовым вариантом предложенная технология позволяет получать более качественную структуру металла по длине пера лопатки с более лучшими прочностными характеристиками.

В заключение необходимо отметить, что использование штампа с разъемными матрицами на заготовительных переходах позволило проводить все операции на кривошипных прессах, а коэффициент использования металла для рассматриваемой лопатки в предложенной технологии увеличился от 14,4 до 65,1 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ковка** и штамповка: справочник в 4 т. Т. 2. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семёнова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.

2. **Дубинин Г.Н., Тананов А.И.** Авиационное материаловедение: учебник для высших учебных заведений гражданской авиации. М.: Машиностроение, 1988. 320 с.

*Владимир Яковлевич Осадчий, д-р техн. наук;*
*Валерий Борисович Леняшин, канд. техн. наук;*
*Ярослав Олегович Князев,*
yaroslav.kn@mail.ru

УДК 621.98.044.7

**А.Ю. Боташев, Н.У. Бисилов** *(Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия, г. Черкесск)*

# Исследование газовой листовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки

*Проведено исследование газовой листовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки, при которой заготовка под воздействием высокотемпературного газа интенсивно нагревается, а затем подвергается штамповке. Установлено, что этот метод позволяет нагреть заготовку до интервала температур горячей обработки, что многократно повышает пластичность заготовки. Определены зависимости для расчета расхода и давления газа, осуществляющего процесс штамповки.*

**Ключевые слова:** пластичность; листовая штамповка; газовая штамповка; утонение; топливная смесь; давление газа; обработка металлов давлением.

*Research of gas sheet press forming with bilateral heating of stock material at which stock material under the influence of high-temperature gas intensively heats up is carried out, and then is exposed to press forming. It is established that this method allows to heat up stock material to interval of temperatures of hot processing that repeatedly increases plasticity of stock material. Dependences for calculation of charge and pressure of the gas which is carrying out process of press forming are defined.*

**Keywords:** plasticity; sheet-metal forming; gas forming; necking; blended fuel; gas pressure; metal forming.

Листовая штамповка чаще всего осуществляется в холодном состоянии заготовки. При этом из-за ограниченной пластичности заготовки детали сложной формы изготовляют за несколько технологических переходов, что повышает себестоимость их производства. Нагрев заготовки, повышая ее пластичность, позволяет упростить изготовление деталей из труднодеформируемых материалов. Так, в частности, при нагреве заготовки потоком воздуха температурой 400...450 °С можно штамповать детали сложной формы из труднодеформируемых цветных сплавов [1, 2]. Наиболее перспективен нагрев заготовки до интервала температур горячей обработки. Это может обеспечить применение метода газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки [3]. Суть метода заключается в том, что заготовку вначале нагревают до заданной температуры под воздействием горячего газа, а затем подвергают деформированию.

*Целью работы* является оценка технологических возможностей данного метода штамповки. Для ее достижения поставлены следующие задачи: оценка возможности нагрева заготовки до интервала температур горячей обработки; оценка габаритных размеров устройства для штамповки; оценка расхода энергоносителя и его давления.

Схема устройства для газовой штамповки представлена на рис. 1. Устройство содержит камеру сгорания *2* и матрицу *1*, между которыми размещается штампуемая заготовка. Полости камеры сгорания *2* и матрицы *1* наполняются газообразной топливной смесью (например, смесью природного газа и сжатого воздуха), которая затем поджигается с помощью свеч *5* и *7*.

В результате сгорания смеси давление и температура в полостях камеры сгорания и матрицы повышаются в 7–8 раз. При этом под воздействием горячего газа, температура которого достигает 2000...2300 °С, заготовка интенсивно нагревается. При достижении температуры заготовки определенной величины открывается выпускной клапан *8* и начинается выпуск

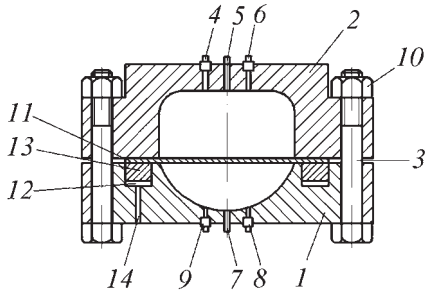



**Рис. 1. Схема устройства для штамповки с кольцевым поршнем:**
*1* – матрица; *2* – камера сгорания; *3* – болт; *4*, *9* – впускные клапаны; *5*, *7* – свечи зажигания; *6*, *8* – выпускные клапаны; *10* – гайка; *11* – заготовка; *12* – полость; *13* – кольцевой поршень; *14* – канал

продуктов сгорания из полости матрицы. Давление в полости матрицы снижается. Под действием разности давлений между камерой сгорания и матрицей заготовка деформируется в направлении матрицы и заполняется ее полость – осуществляется процесс штамповки.

Рассмотрим процесс нагрева заготовки для определения длительности процесса и необходимого количества газа. Нагрев заготовки происходит за счет конвективного теплообмена между газом и заготовкой, а также лучеиспускания газа. Однако, исходя из данных в области двигателей внутреннего сгорания, влияние последнего фактора невелико. Поэтому примем, что нагрев заготовки происходит в результате конвективного теплообмена. Все нагреваемые участки заготовки находятся примерно в одинаковых условиях по отношению к газу. Таким образом будем считать, что имеет место одномерный поток теплоты от газа к заготовке как со стороны камеры сгорания, так и со стороны матрицы (рис. 2). Учитывая это, запишем уравнение теплоотдачи Ньютона

$$dQ = \alpha F (t_г - t_з) d\tau , \qquad (1)$$

где $Q$ – количество теплоты; $\alpha$ – коэффициент теплоотдачи; $F$ – площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки; $t_г$ – температура газа; $t_з$ – температура поверхности заготовки; $\tau$ – время.

Так как температуры газа сверху и снизу заготовки одинаковы, то в первом приближении можно считать, что поток тепла со стороны камеры сгорания и со стороны матрицы примерно одинаковы. Тогда площадь

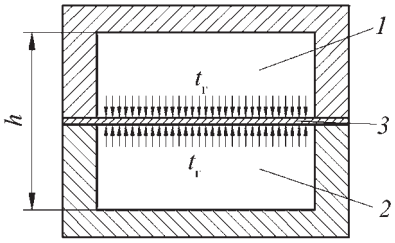



**Рис. 2. Схема нагрева штампуемой заготовки:**
*1* – камера сгорания; *2* – полость матрицы; *3* – заготовка

тепловоспринимающей поверхности заготовки можно определить как

$$F = 2(\pi/4)\, d_м^2 = 0{,}5\, \pi\, d_м^2 , \qquad (2)$$

где $d_м$ – диаметр входной кромки матрицы.

Теплота от заготовки отводится только во фланцевую ее часть, зажатую между камерой сгорания и матрицей. Площадь сечения заготовки, через которую отводится тепло, во много раз меньше ее тепловоспринимающей поверхности, поэтому отвод тепла не велик и им можно пренебречь. Тогда теплота, воспринятая заготовкой от газа, целиком идет на увеличение ее температуры. Следовательно,

$$dQ = m_з\, c_з\, dt_з = 0{,}5\, F s \rho_з\, c_з\, dt_з , \qquad (3)$$

где $m_з$ – масса тепловоспринимающей части заготовки; $\rho_з$, $c_з$ – плотность и удельная теплоемкость материала заготовки соответственно; $dt_з$ – приращение средней температуры заготовки, т.е. осредненной по ее толщине; $s$ – толщина заготовки.

Из уравнений (1) и (3) получим

$$\alpha F (t_г - t_з)\, d\tau = 0{,}5\, F s\, \rho_з\, c_з\, dt_з . \qquad (4)$$

После соответствующих преобразований и интегрирования получим выражение для определения времени нагрева заготовки

$$\Delta\tau = \frac{s \rho_з\, c_з}{2\, \alpha (t_г - t_з)_{ср}}\, \Delta t_з , \qquad (5)$$

где $\Delta t_з$ – приращение температуры заготовки; $(t_г - t_з)_{ср}$ – среднее значение перепада температур между газом и заготовкой.

Для определения величины $\Delta\tau$ по зависимости (5) необходимо знать коэффициент теплоотдачи $\alpha$. Точное определение $\alpha$ является очень сложной задачей. Поэтому воспользуемся известными данными. Так, в поршневых двигателях внутреннего сгорания в период горения топливной смеси $\alpha$ = 3...5 кВт/(м$^2$·К). Причем $\alpha$ существенно зависит от давления газа и скорости ее движения. В первом приближении можно считать, что величина $\alpha$ определяется следующей зависимостью:

$$\alpha = K p^{0,5}\, v^{0,5} ,$$

где $K$ – коэффициент пропорциональности; $p$ – давление газа; $v$ – скорость движения газа.

По сравнению с поршневыми двигателями в данном случае давление газа в 3–5 раз выше, а скорость движения газа примерно такая же. Следовательно, в соответствии с принятой зависимостью (6), коэффициент $\alpha$ будет примерно в 2 раза выше, чем в двигателях внутреннего сгорания, т.е. 6...10 кВт/(м$^2$·К). Имея в виду, что не учитываем нагрев за счет лучеиспускания газа, примем для расчета $\alpha$ = 10 кВт/(м$^2$·К).

Используя зависимость (5), оценим время нагрева стальной заготовки толщиной 3 мм до 1000 °С, т.е.

$s = 0{,}003$ м, $\Delta t_з = 1000$ °С. Будем считать, что в процессе нагрева заготовки температура газа снижается с 2300 до 1600 °С. Тогда максимальный перепад температур между заготовкой и газом $\Delta t_{max} = 2300$ °С, а минимальный перепад температур $\Delta t_{min} = 600$ °С. Средний перепад температур определим по известной формуле

$$\Delta t_{ср} = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln(\Delta t_{max} / \Delta t_{min}) . \qquad (7)$$

По этой зависимости получим $\Delta t_{ср} = 1450$ °С. Следовательно, в зависимости (5) $(t_г - t_з)_{ср} = 1450$ °С. Учитывая, что для стали $c_з = 0{,}46$ кДж/(кг·К); $\rho_з = 7800$ кг/м$^3$, по зависимости (5) получим $\Delta\tau = 0{,}36$ с. Таким образом, время нагрева стальной заготовки толщиной 3 мм до 1000 °С составляет 0,36 с.

При выводе приведенных выше зависимостей считали одинаковыми тепловые потоки со стороны камеры сгорания и матрицы. В действительности тепловой поток со стороны камеры сгорания больше, так как ее объем больше объема матрицы. Поэтому время нагрева заготовки толщиной 3 мм будет выше полученного значения, т.е. составит 0,5...0,6 с. Если толщина заготовки меньше 3 мм, то соответственно уменьшится и время ее нагрева.

Поперечные размеры устройства для штамповки определяются размерами штампуемой заготовки. Оценим необходимую высоту устройства для штамповки в целях обеспечения нагрева заготовки до интервала температур горячей обработки.

Проведя выкладки, аналогичные указанным выше, можно получить следующую зависимость для определения суммарной высоты $h$ камеры сгорания и полости матрицы:

$$h = \frac{s\, c_з\, \rho_з\, \Delta t_з}{c_г\, \rho_г\, \Delta t_г} , \qquad (8)$$

где $c_г$ – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; $\rho_г$ – плотность газа; $\Delta t_г$ – уменьшение температуры газа.

Как было принято выше, для стальной заготовки приращение температуры $\Delta t_з = 1000$ °С, а температура газа снижается с 2300 до 1600 °С, т.е. $\Delta t_г = 700$ °С. Для этого интервала температур средняя теплоемкость газа $c_г = 0{,}9$ кДж/(кг·К). Предельное значение давления топливной смеси составляет 3 МПа, поэтому примем $\rho_г = 30$ кг/м$^3$. Тогда, учитывая ранее принятые значения $\rho_з$ и $c_з$, из зависимости (8) получаем

$$h \approx 440\, S . \qquad (9)$$

Таким образом, для нагрева стальной заготовки толщиной 1 мм суммарная высота $h$ камеры сгорания и полости матрицы должна быть около 440 мм. Если толщина заготовки равна 3 мм, то соответственно $h \approx 1{,}3$ м.

Для определения расхода энергоносителя, т.е. топливной смеси, оценим суммарный объем камеры сгорания и полости матрицы. Если принять, что камера сгорания и полость матрицы имеют цилиндрическую форму, то согласно (9) общий объем рабочего пространства устройства для штамповки

$$V = 0{,}25\, \pi\, d_м^2\, h = 110\, \pi\, d_м^2\, s . \qquad (10)$$

Зная объем рабочего пространства устройства для штамповки, можно вычислить расход топливной смеси на один рабочий цикл устройства по следующей зависимости

$$q = V\, \frac{p_с\, t_а}{p_а\, t_с} = 110\, \pi\, d_м^2\, s\, \frac{p_с\, t_а}{p_а\, t_с} , \qquad (11)$$

где $p_с$, $t_с$ – давление и температура топливной смеси; $p_а$, $t_а$ – давление и температура при нормальных условиях. В данном случае $t_с \approx t_а$, $p_а \approx 0{,}1$ МПа. Если принять диаметр матрицы $d_м = 0{,}5$ м, то для заготовки толщиной 1 мм по зависимости (11) получим $q \approx 2{,}6$ м$^3$. Таким образом, для штамповки деталей диаметром 0,5 м из стальной заготовки толщиной 1 мм расход топливной смеси составляет 2,6 м$^3$. Если использовать в качестве горючего газа пропан-бутан, то его доля в топливной смеси не будет превышать 4 %, следовательно, расход пропан-бутана на одну штампуемую деталь будет не более 0,1 м$^3$.

Определим необходимое давление топливной смеси для осуществления процесса штамповки. Для этого рассмотрим деформирование заготовки, которое начинается после нагрева заготовки до заданной температуры. Так как диаметр заготовки во много раз больше ее толщины, то в данном случае деформируемую заготовку можно считать тонкой оболочкой. Тогда можно воспользоваться уравнением Лапласа для тонкой оболочки:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = \frac{p}{s} , \qquad (12)$$

где $\sigma_m$, $\sigma_\theta$ – меридиональные и широтные напряжения; $\rho_m$, $\rho_\theta$ – меридиональный и широтный радиусы кривизны; $p$ – давление.

Процесс штамповки протекает в два этапа (рис. 3). На первом этапе заготовка деформируется в форме шарового сегмента. При этом $\sigma_m = \sigma_\theta = \sigma$. Поэтому условие пластичности можно записать как $\sigma = \sigma_s$, где

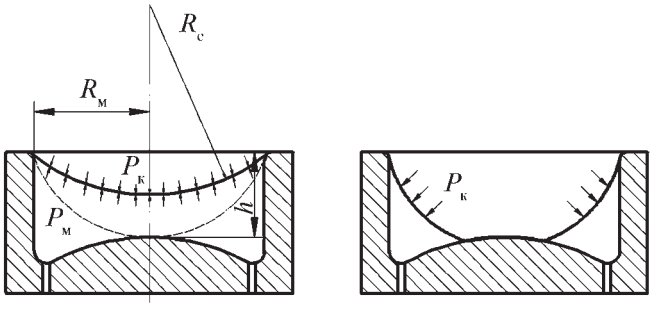



**Рис. 3. Характер деформации заготовки в процессе штамповки**

$\sigma_s$ – предел текучести. Тогда уравнение (12) примет следующий вид:

$$2\frac{\sigma_s}{R_c} = \frac{p}{s}, \qquad (13)$$

где $R_c$ – радиус шарового сегмента. В данном случае давление, которое осуществляет деформирование заготовки, определяется разностью давлений между камерой сгорания и полостью матрицы, т.е. $p = p_к - p_м$. Из уравнения (13) получим

$$p_к - p_м = \frac{2s}{R_c}\sigma_s. \qquad (14)$$

В процессе деформирования заготовки радиус шарового сегмента $R_c$ непрерывно уменьшается, поэтому для обеспечения процесса штамповки перепады давлений должны увеличиваться. Это продолжается до конца первого этапа процесса штамповки, т.е. до соприкосновения центральной части заготовки дна матрицы.

На втором этапе процесса штамповки происходит заполнение периферийной части матрицы, причем заполнение углов матрицы и зон с минимальными радиусами закруглений происходит в конце второго этапа. В этот период давление газа в полости матрицы практически равно нулю, поэтому заполнение этих участков матрицы определяется только давлением газа в камере сгорания. При заполнении этих участков форму заготовки можно считать сферообразной. Тогда из уравнения (14) получим зависимость для определения давления газа в камере сгорания в конце процесса штамповки

$$p_к^* = \frac{2s}{R_{min}}\sigma_s, \qquad (15)$$

где $R_{min}$ – минимальный радиус кривизны данной части матрицы.

Учитывая значение $p_к^*$, определим давление газа в начале процесса штамповки. В течение процесса штамповки газ в конце сгорания расширяется, при этом объем газа увеличивается на величину объема полости матрицы. Ввиду кратковременности процесса будем считать процесс расширения газа адиабатическим. Тогда из уравнения адиабатического процесса можно получить следующую зависимость для определения давления газа в начале процесса штамповки:

$$p_{к_0} = \left(1 + \frac{V_м}{V_к}\right)^к p_к^*, \qquad (16)$$

где $V_м$, $V_к$ – объем полости матрицы и камеры сгорания. Это давление создается за счет сгорания топливной смеси. Так как сгорание происходит при постоянном объеме, то

$$p_{к_0} = \lambda\beta p_c, \qquad (17)$$

где $\lambda$ – степень повышения давления в результате сгорания топливной смеси при постоянном объеме; $\beta$ – степень снижения давления из-за охлаждения газа при нагреве заготовки. Для газовоздушных топливных смесей $\lambda$ = 7...8. Величина $\beta$ = 0,5...0,7. Из зависимостей (15)–(17) получим выражение для определения давления топливной смеси:

$$p_c = \frac{2s\sigma_s}{\lambda\beta R_{min}}\left(1 + \frac{V_м}{V_к}\right)^к. \qquad (18)$$

**Рис. 4. Экспериментальное устройство**

Используя эту зависимость, оценим величину давления топливной смеси для случая штамповки деталей из малоуглеродистой стали. В этом случае в интервале температур 900...1000 °С предел текучести составляет 20...30 МПа, поэтому примем $\sigma_s$ = 25 МПа. Пусть минимальный радиус кривизны донной части матрицы равен 15 мм. Объем полости матрицы составляет 20...25 % объема камеры сгорания, поэтому примем $V_м = 0{,}2\,V_к$. Тогда для штамповки цилиндрической детали толщиной 1 мм из зависимости (18) получим $p_c \approx 0{,}9$ МПа.

Для оценки справедливости зависимости (18) была проведена штамповка сферического днища на экспериментальном устройстве, представленном на рис. 4. Штамповке подвергали листовую заготовку толщиной 1 мм из стали в цилиндрической матрице диаметром 200 мм. Для этого случая расчетное значение давления топливной смеси по зависимости (18) составляет 0,22 МПа. Фактическое значение давления топливной смеси 0,25 МПа. Таким образом, расхождение расчетных и фактических значений давления не превышает 15 %, что вполне допустимо. Полученные результаты косвенно подтверждает также нагрев заготовки до интервала температур горячей обработки, однако для большей достоверности планируется провести замер температур заготовки.

**Выводы.** Метод газовой штамповки с двухсторонним нагревом штампуемой заготовки позволяет осуществить нагрев заготовки до интервала температур горячей обработки и последующее ее деформирование в полости матрицы. Время нагрева заготовки в зависимости от ее толщины составляет 0,2...0,6 с. При штамповке детали, имеющей поверхности с радиусом кривизны 15 мм, из стального листа толщиной 1 мм давление топливной смеси не превышает 1 МПа, а расход горячего газа при этом составляет 0,1 м$^3$.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ковалевич М.В.** Расчет режимов пневмотермической формовки деталей коробчатой формы в режиме сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство. 2006. № 9. С. 35–39.

2. **Алексеев П.А., Панченко Е.В.** Моделирование процесса формообразования осесимметричной оболочки в режиме сверхпластичности // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 295 с.

3. **Пат. на полезную модель 98954 РФ, МПК B21 D 22/00.** Опубл. 10.11.2010. Бюл. № 31.

*Анвар Юсуфович Боташев, д-р техн. наук;*
*Назим Урусланович Бисилов,*
w9187124909@mail.ru

УДК 621.73.047(045)-034.14

**Л.С. Кохан, В.И. Пунин*, Г.Б. Ремпель**
*(Московский государственный вечерний металлургический институт,*
** Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

# Вальцовка профилей с параболическим сечением

*Предложена методика выбора оптимальной калибровки заготовки для получения вальцованного параболического профиля.*

**Ключевые слова:** металлические профили; вальцовка; прокатка; параболический калибр.

*The methodology of optimal choiceof workpiece calibration for getting rolled parabolic profile is presented.*

**Keywords:** metallic profiles; forge-rolling; rolling; parabolic caliber.

Металлические профили с параболическим сечением, как известно, имеют ряд прочностных и технологических преимуществ и широко используются в промышленности. Так, из всей номенклатуры заготовок, применяемых в авиационной отрасли, свыше 40 % составляют детали удлиненной формы с резкой разницей площадей поперечных сечений вдоль оси – лопатки, закрылки, стойки и др. Перспективным способом получения такого типа заготовок является процесс вальцовки на прокатных станах.

Рассмотрим задачу выбора оптимальных параметров заготовки и разработки технологического процесса горячей вальцовки заготовок в целях повышения коэффициента использования металла, снижения силовых нагрузок на оборудование и инструмент и повышения эксплуатационных свойств изделия. Исследуем получение параболического профиля размерами $B \times H \times h$, исходя из четырех схем вальцовки заготовки круглого, квадратного и прямоугольного сечения.

## 1. Вальцовка изделия "круг–параболический профиль"

Для расчета параметров параболического профиля (см. рисунок) задаем его зависимость по краевым условиям: $y = k_1 + k_2 x^2$.

При $x = 0$ $\quad y = k_1 + k_2 \cdot 0 = \dfrac{H}{2}$ и $k_1 = \dfrac{H}{2}$.

При $x = \dfrac{B}{2}$ и $y = 0$ $\quad y = \dfrac{H}{2} + k_2 \dfrac{B^2}{4} = \dfrac{h}{2}$ и $k_2 = -\dfrac{2\,(H-h)}{B^2}\,x^2$.

Тогда

$$y = \frac{H}{2} - \frac{2\,(H-h)}{B^2}\,x^2. \qquad (1)$$

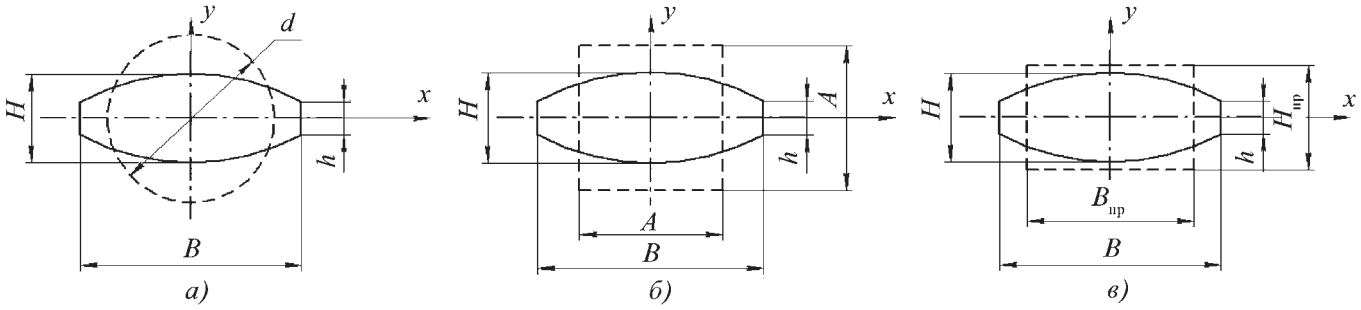



**Схема вальцовки с калибровкой:**
*а* – круг–параболический профиль; *б* – квадрат–параболический профиль; *в* – прямоугольник–параболический профиль

Площадь сечения:

$$F_{\text{пар}} = 4\int_0^{B/2} y\,dx = B\left(H - \frac{H-h}{3}\right). \quad (2)$$

Коэффициент вытяжки

$$\mu = \frac{F_{\text{кр}}}{F_{\text{пар}}} = \frac{\pi}{4}\frac{d^2}{F_{\text{пар}}}, \text{ откуда } d = \sqrt{\frac{4\mu F_{\text{пар}}}{\pi}}. \quad (3)$$

Вытяжка $\mu$ изменяется в пределах 1,35...1,70. Далее проводим проверку выбранного режима. Для этого строим кинематическое поле перемещений.

Принимаем горизонтальное перемещение $U_x = k_1 x + k_2 y$.

При $x = 0$ и $y = \frac{d}{2}$ $\quad U_x = \frac{B}{2} - \frac{d}{2} = k_1\frac{d}{2}$, откуда $k_1 = \frac{B}{d} - 1$.

Соответственно,

$$U_x = \left(\frac{B}{d} - 1\right)x \text{ и относительная деформация } \varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{B}{d} - 1. \quad (4)$$

Вертикальное перемещение: $U_y = k_1 x + k_2 y$.

При $x = \frac{B}{2}$ и $y = 0$ $\quad U_y = 0 = k_1\frac{B}{2} + k_2 \cdot 0$, откуда $k_1 = 0$.

При $x = 0$ и $y = \frac{d}{2}$ $\quad U_x = \frac{h}{2} - \frac{d}{2} = k_2\frac{d}{2}$, откуда $k_2 = \frac{h}{d} - 1$.

Соответственно,

$$U_y = \left(\frac{h}{d} - 1\right)y \text{ и } \varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y} = \frac{h}{d} - 1. \quad (5)$$

Согласно методике В.Л. Колмогорова [1], степень деформации сдвига при разрушении определяется коэффициентом жесткости напряженного состояния $K_{\text{ж}} = \frac{\overline{\sigma}_{\text{ср}}}{\sqrt{3}}$, где $\overline{\sigma}_{\text{ср}}$ – среднее относительное давление,

$$\overline{\sigma}_{\text{ср}} = \frac{2}{\varepsilon_y\,\delta}\left(\frac{1}{(1-\varepsilon_y)^{0,5(\delta-1)}} - 1 + 0,5\,\varepsilon_y\right), \quad (6)$$

где $\delta$ – основной параметр вальцовки,

$$\delta = \frac{2f}{\sqrt{\frac{d\,\varepsilon_y}{R_k}}}, \quad (7)$$

где $f$ – коэффициент трения; $R_k$ – катающий радиус, для сечения с высотой $h$:

$$R_k = \frac{0,9\,D_{\text{вал}} - h}{2}, \quad (8)$$

$D_{\text{вал}}$ – диаметр валков.

По величине $K_{\text{ж}}$ и диаграммам пластичности [1] устанавливаем степень деформации сдвига при разрушении материала профиля $\lambda_p$. Режим выбран правильно, если запас ресурса пластичности $\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p}$ меньше допускаемого значения $[\psi] = 0,28$. Режим определяется степенью деформации сдвига

$$\lambda_p = 2\sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - \varepsilon_x\,\varepsilon_y}. \quad (9)$$

Последняя проверка устанавливает устойчивость самого профиля по критической силе

$$P_{\text{кр}} = \frac{J\,E\,\pi^2}{2\,L_k^2}, \tag{10}$$

где $J$ – момент инерции профиля,

$$J = B^3\left(\frac{H}{12} - \frac{H-h}{20}\right); \tag{11}$$

$E$ – модуль упругости, $E = 1{,}6\cdot 10^5$ МПа; $L_k$ – расстояние между направляющими роликами валков стана.

Коэффициент устойчивости [1]

$$K_{\text{уст}} = \frac{P_{\text{кр}}}{P},$$

где $P$ – сила вальцовки,

$$P = \overline{\sigma}_{\text{ср}}\,\sigma_{\text{т}\,0}\,B\,l; \tag{12}$$

$l$ – длина дуги захвата, $l = \sqrt{d\,\varepsilon_y\,R_k}$ .

Режим выбран правильно, если $K_{\text{уст}} > [K_{\text{уст}}] = 1{,}3$ [1].

Проведем по данной методике проверку выбора круглой заготовки для вальцовки стального профиля с размерами $H$ = 24 мм, $h$ = 10 мм, $B$ = 65 мм на стане с валками катающего диаметра $d_{\text{в}}$ = 350 мм и расстоянием $L_k$ = 700 мм:

$$l = \sqrt{50\cdot 0{,}52\cdot 145{,}5} = 61{,}5 \text{ мм}.$$

Последовательно вычисляются:

площадь изделия по (2)

$$F_{\text{пар}} = 65\cdot\left(24 - \frac{24-10}{3}\right) = 1257 \text{ мм};$$

при вытяжке $\mu$ = 1,55 по (3)

$$d = \sqrt{\frac{4\cdot 1{,}55\cdot 1257}{\pi}} = 49{,}8 \text{ мм}.$$

Принимаем $d$ = 50 мм.

Относительная деформация по (4) и (5)

$$\varepsilon_x = \frac{65}{50} - 1 = 0{,}3; \qquad \varepsilon_y = \frac{24}{50} - 1 = -0{,}52.$$

Уширение $\Delta B = d\,\varepsilon_x = 50\cdot 0{,}3 =$ 15 мм.

Основной параметр вальцовки по (7) $\delta = \dfrac{2\cdot 0{,}35}{\sqrt{\dfrac{50\cdot 0{,}52}{145{,}5}}} = 1{,}66$,

где по (8) $R_k = \dfrac{0{,}9\cdot 350 - 24}{2} = 145{,}5$ мм.

Определим по (6) $\overline{\sigma}_{\text{ср}} = \dfrac{2}{1{,}66\cdot 0{,}52}\left(\dfrac{1}{(1-0{,}52)^{0{,}5\cdot 0{,}66}} - 1 + 0{,}5\cdot 0{,}52\right) = 1{,}237$.

Соответственно, $K_ж = \frac{\overline{\sigma}_{ср}}{\sqrt{3}} = -\frac{1,237}{\sqrt{3}} = -0,7$.

По графику степени деформации сдвига при разрушении [1] определяем $\lambda_p = 4,6$. Степень деформации сдвига процесса по (9) $\lambda_p = 2\sqrt{0,3^2 + 0,52^2 - 0,3 \cdot 0,52} = 0,904$.

Используемый запас ресурса пластичности $\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p} = \frac{0,904}{4,6} = 0,198 < [\psi] = 0,28$.

Проверяем устойчивость изделия.

Момент инерции по (11) $J = 65^3 \left(\frac{24}{12} - \frac{24-10}{20}\right) = 357\ 012,5$ мм$^4$.

По (10) $P_{кр} = \frac{357\,012,5 \cdot 1,6 \cdot 10^5 \cdot \pi^2}{2 \cdot 700^2} = 574\,693,9$ Н.

Коэффициент упрочнения по [2] $K_\varepsilon = 1,25$ при скорости деформации

$$U = \frac{\varepsilon_y \text{v}}{l} = \frac{0,52 \cdot 800}{61,5} = 6,76\ 1/\text{с},$$

где v – скорость вальцовки, для стана с диаметрами валков 350 мм v = 800 мм/с [1].

Далее скоростной коэффициент $K_U = 1,1$ [2], при температуре процесса 1100 °С температурный коэффициент $K_t = 0,75$, сопротивление пластической деформации стали при горячем процессе $\sigma_{т0} = 80$ МПа.

$\sigma_т = \sigma_{т\,0} K_\varepsilon K_U K_T = 80 \cdot 1,25 \cdot 1,1 \cdot 0,75 = 82,5$ МПа.

Откуда по (12) $P = 1,237 \cdot 80 \cdot 65 \cdot 61,5 = 407\ 995,2$ Н.

$K_{уст} = \frac{P_{кр}}{P} = \frac{574\,693,9}{407\,995,2} = 1,408 > [K_{уст}] = 1,3$, следовательно, процесс устойчив.

Отметим, что расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:

$$F_{кр} = \frac{\pi}{4} \cdot 50^2 = 1962,5\ \text{мм}^2.$$

## 2. Вальцовка изделия "квадрат–параболический профиль"

Аналогично первому варианту при краевых условиях $x = 0$ и $y = \frac{A}{2}$ $U_x = 0$ и $k_2 = 0$.

При $x = \frac{B}{2}$ и $y = 0$ $U_x = \frac{B}{2} - \frac{A}{2} = k_1 \frac{A}{2}$, откуда $k_1 = \frac{B}{A} - 1$.

$$U_x = \left(\frac{B}{A} - 1\right) x \text{ и } \varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{B}{A} - 1.$$

$$U_y = k_1 x + k_2 y.$$

При $x = 0$ и $y = \frac{A}{2}$ $U_x = \frac{H}{2} - \frac{A}{2} = k_2 \frac{A}{2}$, откуда $k_2 = \frac{H}{A} - 1$.

Соответственно, $U_y = \left(\frac{H}{A} - 1\right) y$ и $\varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y} = \frac{H}{A} - 1$.

Далее при $H = 24$ мм, $h = 10$ мм, $B = 65$ мм и $F_{пар} = 1257$ мм$^2$ выбираем сторону квадрата $A$ из условия вытяжки $A = 43,32$ мм. Принимаем $A = 44$ мм. Относительная деформация составит $\varepsilon_x = \frac{65}{44} - 1 = 0,477$ и $\varepsilon_y = \frac{24}{44} - 1 = -0,454$.

Уширение $\Delta B = A\,\varepsilon_x = 44 \cdot 0,477 = 20,99 = 21$ мм.

Проверим процесс на устойчивость.

Основной параметр вальцовки по (7) $\delta = \dfrac{2 \cdot 0{,}35}{\sqrt{\dfrac{44 \cdot 0{,}454}{145{,}5}}} = 1{,}89$.

Определим по (6) $\overline{\sigma}_{\text{ср}} = \dfrac{2}{1{,}89 \cdot 0{,}454}\left(\dfrac{1}{(1-0{,}454)^{0{,}5 \cdot 0{,}89}} - 1 + 0{,}5 \cdot 0{,}454\right) = 1{,}249$.

$K_{\text{ж}} = \dfrac{\overline{\sigma}_{\text{ср}}}{\sqrt{3}} = -\dfrac{1{,}249}{\sqrt{3}} = -0{,}722$, откуда по диаграмме пластичности [1] $\lambda_p = 4{,}65$.

По (9) определим $\lambda_p = 2\sqrt{0{,}477^2 + 0{,}454^2 - 0{,}477 \cdot 0{,}454} = 0{,}932$.

Используемый запас ресурса пластичности $\psi = \dfrac{\lambda}{\lambda_p} = \dfrac{0{,}932}{4{,}65} = 0{,}2 < [\psi] = 0{,}28$, что подтверждает условия сплошности изделия и правильность режима обработки.

Аналогично проверяем устойчивость изделия.

Длина дуги захвата $l = \sqrt{A\,\varepsilon_y\,R_k} = \sqrt{44 \cdot 0{,}454 \cdot 145{,}5} = 53{,}9$ мм.

По [2] $K_\varepsilon = 1{,}32$ при скорости деформации $U = \dfrac{\varepsilon_y\,\text{v}}{l} = \dfrac{0{,}52 \cdot 800}{53{,}9} = 6{,}74$ 1/с.

По (10) $P_{\text{кр}} = \dfrac{357\,012{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^5 \cdot \pi^2}{2 \cdot 700^2} = 574\,693{,}9$ Н.

Коэффициент упрочнения по [2] $K_\varepsilon = 1{,}25$ при скорости деформации $U = \dfrac{\varepsilon_y\,\text{v}}{l} = \dfrac{0{,}52 \cdot 800}{61{,}5} = 6{,}76$ 1/с; $K_U = 1{,}23$.

$$\sigma_{\text{т}} = \sigma_{\text{т}\,0}\,K_\varepsilon\,K_U\,K_T = 80 \cdot 1{,}32 \cdot 1{,}23 \cdot 0{,}75 = 97{,}42 \text{ МПа}.$$

Откуда по (12) $P = 1{,}249 \cdot 80 \cdot 65 \cdot 53{,}9 = 350\,069{,}7$ Н.

Запас устойчивости $K_{\text{уст}} = \dfrac{P_{\text{кр}}}{P} = \dfrac{574\,693{,}9}{350\,069{,}7} = 1{,}64 > [K_{\text{уст}}] = 1{,}3$, следовательно, процесс устойчив.

Отметим, что расход материала заготовки определяется площадью ее сечения: $F_{\text{кр}} = A^2 = 44^2 = 1936$ мм$^2$.

### 3. Вальцовка изделия "прямоугольник–параболический профиль"

При этом варианте вальцовки высота заготовки $h_{\text{пр}}$ определяется через высотный коэффициент $\eta = \dfrac{h_{\text{пр}}}{h} = 1{,}1 \ldots 1{,}4$. Принимаем $\eta = 1{,}3$ и $h_{\text{пр}} = \eta\,h = 1{,}3 \cdot 24 = 31{,}2$ мм. Принимаем $h_{\text{пр}} = 31$ мм.

Из условия вытяжки определяем ширину заготовки: $B_{\text{пр}} = \dfrac{\mu\,F_{\text{пар}}}{h_{\text{пр}}} = \dfrac{1{,}3 \cdot 1256{,}7}{31} = 49{,}46$ мм. Принимаем $B_{\text{пр}} = 50$ мм.

Тогда $\mu = \dfrac{50 \cdot 31}{1256{,}7} = 1{,}233$.

Согласно (1) и (2) соответственно:

$$\varepsilon_x = \frac{B}{B_{\text{пр}}} - 1 = \frac{65}{50} - 1 = 0{,}3; \quad \varepsilon_y = \frac{h}{h_{\text{пр}}} - 1 = \frac{24}{31} - 1 = -0{,}226.$$

Проверяем деформационную устойчивость процесса:

по (7) $\delta = \dfrac{2 \cdot 0{,}35}{\sqrt{\dfrac{31 \cdot 0{,}226}{145{,}5}}} = 3{,}19$,

тогда по (6) $\overline{\sigma}_{\text{ср}} = \dfrac{2}{3{,}19 \cdot 0{,}226}\left(\dfrac{1}{(1-0{,}226)^{0{,}5 \cdot 1{,}095}} - 1 + 0{,}5 \cdot 0{,}226\right) = 0{,}99$.

**Параметры калибровки для изготовления профиля**

| Вид калибровки | Площадь сечения заготовки $F$, мм$^2$ | Используемый запас ресурса пластичности $\psi$ | Запас устойчивости $K_{уст}$ | Сила процесса $P$, Н |
|---|---|---|---|---|
| Круг–параболический профиль | 1963 | 0,198 | 1,408 | 407 995 |
| Квадрат–параболический профиль | 1936 | 0,2 | 1,64 | 350 070 |
| Прямоугольник–параболический профиль | 1550 | 0,131 | 3,29 | 174 649 |
| Ромб–параболический профиль | 1369 | 0,205 | 1,37 | 419 912 |

По [1] $K_ж = \frac{\overline{\sigma}_{ср}}{\sqrt{3}} = -\frac{0,99}{\sqrt{3}} = -0,573$ и $\lambda_p = 4,12$.

По (9) определим $\lambda_p = 2\sqrt{0,3^2 + 0,226^2 - 0,3 \cdot 0,226} = 0,54$.

Используемый запас ресурса пластичности $\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p} = \frac{0,54}{4,12} = 0,131 < [\psi] = 0,28$.

Проверяем устойчивость профиля.

При обжатии $\varepsilon_y = -0,226$ по [2] $K_\varepsilon = 1,2$.

При длине дуги захвата $l = \sqrt{h_{пр}\ \varepsilon_y\ R_k} = \sqrt{31 \cdot 0,226 \cdot 145,5} = 31,93$ мм и времени $t = \frac{l}{v} = \frac{31,93}{800} = 0,04$ с скорость деформации $U = \frac{\varepsilon_y}{t} = \frac{0,226}{0,04} = 5,65$ 1/с и скоростной коэффициент $K_U = 1,18$.

По [2] $\sigma_т = \sigma_{т0}\ K_\varepsilon\ K_U\ K_T = 80 \cdot 1,2 \cdot 1,18 \cdot 0,75 = 85$ МПа.

Тогда по (12) сила вальцовки $P = 85 \cdot 1,99 \cdot 65 \cdot 31,93 = 174\,649$ Н.

Запас устойчивости $K_{уст} = \frac{P_{кр}}{P} = \frac{574\,693,9}{174\,649} = 3,29 > [K_{уст}] = 1,3$, следовательно, процесс устойчив.

Отметим, что расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:

$$F_{кр} = h_{пр}\ B_{пр} = 31 \cdot 50 = 1550 \text{ мм}^2.$$

Аналогичным образом рассчитывается вариант вальцовки с калибровкой "ромб–параболический профиль".

В таблице приведены основные параметры калибровки для изготовления заданного профиля по различным технологическим схемам.

Из данных таблицы следует, что оптимальным вариантом является вальцовка с калибровкой "прямоугольник–параболический профиль", так как используется заготовка с наименьшей площадью сечения, процесс проводится при наименьшей силе и обладает наибольшим запасом устойчивости.

Получено существенное повышение стабильности эксплуатационных свойств изделия. Это подтверждено опытно-производственными испытаниями, проведенными на кафедре МиОМД МГВМИ и других предприятиях. Установлено, что при оптимальной калибровке коэффициент использования металла повышается на 15...20 %, силовая нагрузка снижается на 25...30 % при большей равномерности эксплуатационных свойств (распределении деформации).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
2. **Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др.** Теория прокатки. М.: Металлургия, 1982. 335 с.

*Лев Соломонович Кохан, д-р техн. наук;*
*Владимир Иванович Пунин, канд. техн. наук,*
vipunin@mail.ru;
*Георгий Борисович Ремпель*

УДК 641.544

**С.Н. Сысоев, Р.А. Никитин, А.В. Федотов**
*(Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)*

# Камерный захватный агрегатный модуль для транспортировки бухты медной трубки упорядоченной намотки

*Рассмотрен новый камерный захватный агрегатный модуль. Применение структуры захватного модуля с системой приводов, выполняющего функции захвата и отпускания, а также поднятия и опускания изделия предотвращает механические повреждения бухты трубки упорядоченной намотки на протяжении всего технологического процесса ее транспортировки. Захватное устройство внедрено в ОАО "Кольчугцветмет" в цех производства бухт медных труб упорядоченной намотки.*

**Ключевые слова:** камерный захватный агрегатный модуль; метод поискового конструирования; система приводов; мембрана.

*The new chamber capture modul is considered. Application of the structure of the capture module with system of the drives, carrying out functions of capture release, and also raisings and product lowerings. It prevents mechanical damages of coil of tube of the ordered winding throughout all technological process of its transportation. The results of the work are used in JSC "Kolchugcvetmet" in the shop of manufacture of coils of copper pipes of the ordered winding.*

**Keywords:** chamber capture modul; method of constructing search; drive system; membrane.

В современном мире качество изготовления продукции определяется совокупностью свойств процесса ее изготовления, соответствием этого процесса и его результатов установленным требованиям. Основными производственными факторами являются качество оборудования, физико-химические, механические и другие свойства исходных материалов, совершенство разработанного технологического процесса и отслеживание его на каждом этапе.

Технологический процесс должен быть прогрессивным, обеспечивать повышение производительности труда, сокращение трудовых и материальных затрат на его реализацию. Ряд современных машиностроительных производств сталкиваются с необходимостью решения задач по транспортировке изделия значительной массы при незначительном допустимом механическом воздействии на захватываемую поверхность.

На машиностроительных предприятиях при изготовлении медной трубки для перемещения бухт массой до 250 кг из труб упорядоченной намотки применяют мостовой кран. Существующее оборудование и технологии не обеспечивают целостности изделия. Материал трубки после термической обработки продолжительное время имеет невысокую жесткость, что осложняет реализацию ее транспортирования из печи на следующую технологическую позицию для проведения необходимых технологических операций или упаковку в тару.

Применение современных камерных захватных устройств [1, 2], разработанных Владимирским государственным университетом для ОАО "Кольчугцветмет", где используется нерастяжимая рубашка, охватывающая камерный механизм, снижает удельное давление рабочего органа на захватываемую поверхность, предотвращая возможные механические повреждения изделия при выполнении функции захвата и удержания изделия.

Однако производственный опыт показал, что установка бухты на рабочую поверхность применяемым оборудованием, например, мостовым краном, зачастую приводит к значительным механическим воздействиям и деформации нижнего витка бухты. Появление брака на конечных этапах производства резко снижает эффективность работы предприятия.

Разработка камерного захватного устройства, предотвращающего механические повреждения бухты трубки упорядоченной намотки на протяжении всего технологического процесса ее транспортировки, является актуальной.

Для решения поставленной задачи, нахождения инновационного технического решения использовали метод поискового конструирования, получившего название метода исследования функционально-физических связей [3].

Анализ структуры потребностей, функциональной структуры работы захватного устройства выявил, что требуется разработать устройство, которое по команде "взять изделие" должно захватить изделие, а затем "приподнять" его. После транспортировки по команде "установить изделие" устройство должно выполнить опускание изделия на рабочую поверхность, а затем отпустить его.

Камерный захватный агрегатный модуль [4] представляет собой систему приводов: привода, выполняющего функции захвата и отпускания изделия и привода, выполняющего функции поднятия и опускания изделия. Причем функции выполняются последовательно. После выполнения функции захвата изделия производится поднятие его, а после опускания устройства с захваченным изделием – отпускание изделия на рабочую поверхность.

Камерный захватный агрегатный модуль относится к подъемно-транспортному машиностроению, в частности к захватам для грузов с внутренней полостью.

Наиболее эффективно применение устройства для захвата и подъема, транспортировки и установки на рабочую поверхность изделий из легко разрушающегося материала.

Камерный захватный модуль (рис. 1) состоит из несущего корпуса *6*, жестко закрепленного на нем камерного приводного механизма, включающего эластичную оболочку *5*, полость которой сообщена с источником сжатого воздуха.

На торцевых поверхностях корпуса закреплены мембраны с жесткими центрами и разными диаметрами *3*, *4*. Мембраны соединены между собой штоком *2*.

Устройство работает следующим образом. Перемещение захватного модуля происходит с помощью мостового крана и тельфера. Камерный захват опускается в полость изделия. В исходном положении из камеры захвата воздух стравлен. Для захвата груза сжатый воздух подается по трубопроводу в камеру, которая, расширяясь, прижимается к поверхности транспортируемого изделия. Выполняется функция захвата изделия. При дальнейшем повышении избыточного давления происходит и приподнятие груза.

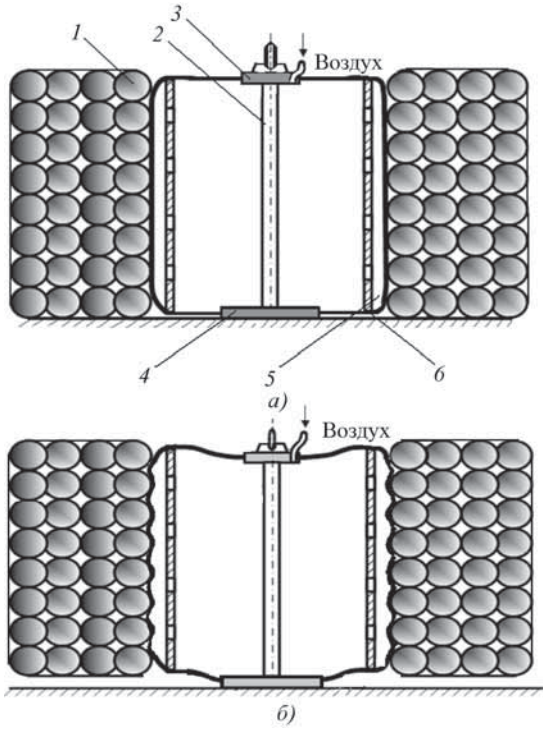



**Рис. 1. Схема камерного захватного агрегатного модуля:** *а* – исходное состояние; *б* – функция "захват и приподнятие" изделия

Приподнятие груза достигается тем, что в камерном захватном агрегатном модуле, содержащем навешиваемый на грузоподъемный механизм несущий полый корпус, выполненный с перфорированной боковой поверхностью и эластичной оболочкой, на торцевых поверхностях корпуса закреплены мембраны с жесткими центрами, соединенные между собой штоком и имеющими разные эффективные площади. После окончания транспортных операций воздух из полости эластичной оболочки стравливается, при этом груз плавно опускается на рабочую поверхность, изделие освобождается.

Соотношение между площадями верхней и нижней жесткими центрами мембран определяет величину силы, которая действует на груз и приподнимает его.

Моделированием и проведением машинного эксперимента подтверждена работоспособность камерного захватного агрегатного модуля.

В расчетном комплексе Ansys была создана 3D-модель камерного захвата и проведена оптимизация его конструкции в целях достижения наибольшего хода приподнятия груза. Изменяемые параметры конструкции – значения радиусов верхней и нижней мембран. На рис. 2 изображена упрощенная для расчетов модель камерного захвата, разрезанная по осям симметрии.

Входные параметры – радиусы верхней и нижней мембран с жесткими центрами. Целевая функция $H$ – высота поднятия груза. Необходимо получение максимального значения высоты поднятия, которая зависит от разницы радиусов верхней $R_в$ и нижней $R_н$ мембран с жесткими центрами.

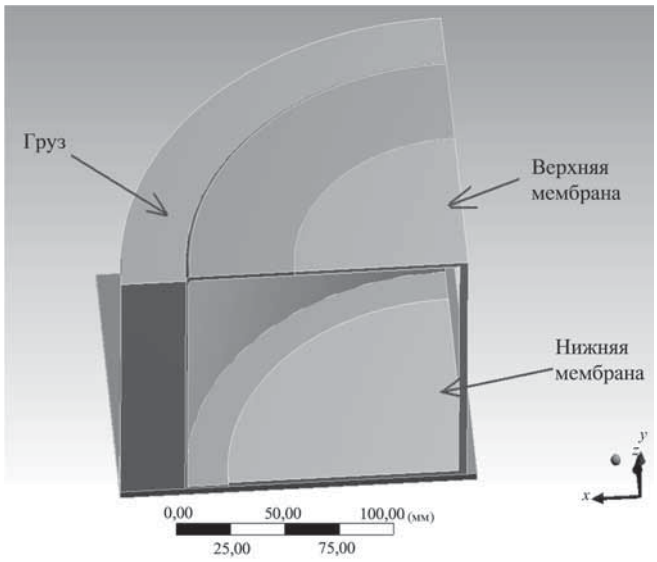



**Рис. 2. 3D-модель камерного захватного агрегатного модуля**

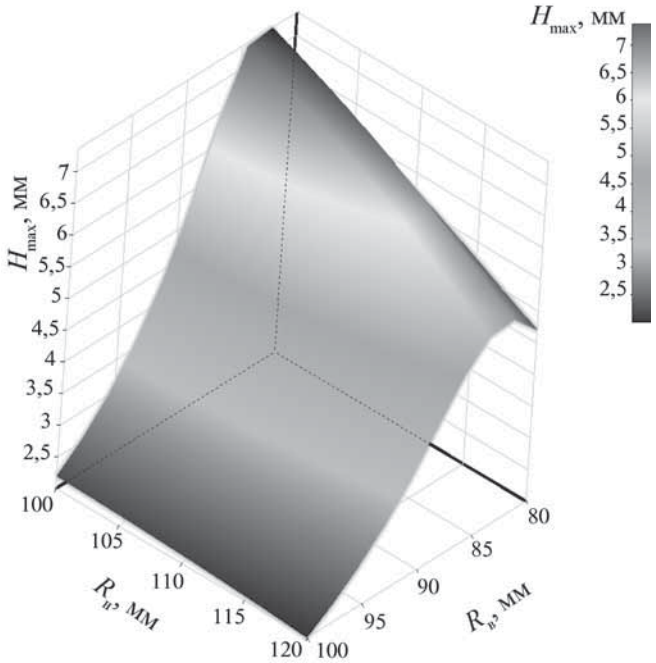



**Рис. 3. Поверхность отклика**

Оптимизация проводилась в расчетной среде Ansys Workbench с помощью модуля Ansys Design Xplorer. Диапазон значений радиусов верхней и нижней мембран ±10 % от начальных значений. Число комбинаций радиусов верхней и нижней мембран равно 9.

При анализе модели в Ansys камерного захвата со всеми комбинациями радиусов мембран построена поверхность отклика (рис. 3), описывающая изменение целевой функции (высоты поднятия груза) в зависимости от изменения двух входных параметров.

Максимальное значение высоты поднятия груза $H_{max} = 6{,}44$ мм получено при радиусе нижней мембраны 110 мм и радиусе верхней мембраны 80 мм.

Разработанный и исследованный новый камерный захватный агрегатный модуль предотвращает механические повреждения бухты трубки упорядоченной намотки на протяжении всего технологического процесса ее транспортировки, повышая эффективность работы промышленного предприятия.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2409514 РФ, МПК B 66 C 1/54.** Захватное устройство / С.Н. Сысоев, Ю.В. Черкасов, А.В. Бакутов, Р.А. Никитин. № 2009145335/11; заявл. 07.12.2009; опубл. 20.01.2011, Бюл. № 19.

2. **Сысоев С.Н., Никитин Р.А.** Камерное захватное устройство для транспортировки бухты медной трубки упорядоченной намотки // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 30–32.

3. **Сысоев С.Н.** Принципы и методы нахождения технических решений. Метод исследования функционально-физических связей. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. 214 с.

4. **Пат. 116846 U1 РФ, МПК B 66 C 1/54.** Камерный захватный агрегатный модуль / С.Н. Сысоев, Р.А. Никитин, А.В. Федотов. № 2011154231/11; заявл. 28.12.2011; опубл. 10.06 2012.

*Сергей Николаевич Сысоев, д-р техн. наук;*
*Роман Александрович Никитин,*
niknamerom@mail.ru;
*Алексей Владимирович Федотов*

***ООО "Издательство Машиностроение"***
***продолжает подписку на журнал***
**«ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

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

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

**107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4,**
**тел.: (499) 269-6600, 269-5298, факс: (499) 269-4897,**
**e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru**

УДК 669.762:669.24

**А.М. Волков, Г.С. Гарибов** *( ОАО "ВИЛС", г. Москва)*

# Влияние температурных режимов закалки на структуру и механические свойства дискового гранулируемого жаропрочного никелевого сплава

*Приведены данные о различных режимах закалки жаропрочных никелевых сплавов, применяемых в качестве материала дисков газотурбинных двигателей. Рассмотрены особенности закалки гранулируемых сплавов. Указаны результаты работ, направленных на повышение стабильности свойств заготовок дисков из высокопрочного гранулируемого никелевого сплава ВВ751П за счет оптимизации технологии термической обработки.*

**Ключевые слова:** диски; газотурбинные двигатели; металлургия гранул; жаропрочные никелевые сплавы; горячее изостатическое прессование; термическая обработка; закалка; микроструктура; механические свойства.

*Data on various solution heat treatment conditions for Ni-base superalloys used as material for gas-turbine engine disks are presented. Features of solution heat treatment of granulated Ni-base superalloys are discussed. The results of studies aimed at improvement in stability of properties of VV751P high-strength granulated Ni-base superalloy disks due to optimization of the heat treatment technology are shown.*

**Keywords:** disks; gas-turbine engines; powder metallurgy; Ni-base superalloys; hot isostatic pressing; heat treatment; solution heat treatment; microstructure; mechanical properties.

С использованием технологии металлургии гранул в ОАО "ВИЛС" создано новое поколение гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов класса ВВП – ВИЛС Высокожаропрочный Порошковый [1, 2], которые предназначены для использования в качестве материала турбинных дисков, пустотелых валов и других критических деталей перспективных авиационных ГТД.

Разработан и паспортизован высокопрочный сплав ВВ751П с пределом прочности более 1600 МПа, состав и технология производства которого защищены патентами РФ [3, 4]. С 2009 г. ведущим российским авиадвигателестроительным компаниям было поставлено более 80 заготовок крупногабаритных дисков (рис. 1).

Одним из самых важных этапов, определяющих структуру и механические характеристики материала, является термическая обработка, позволяющая управлять уровнем свойств сплавов в широком диапазоне значений. Типичный режим термической обработки жаропрочного никелевого сплава, применяемого в качестве материала турбинных дисков, состоит из закалки и старения (одно-, двух- или трехступенчатого). Некоторые режимы включают в себя предварительный отжиг. Последнее обычно характерно для деформируемых сплавов и вызвано необходимостью гомогенизации и прохождения рекристаллизации [5].

Для современных сплавов указанного класса, содержащих в структуре 50...65 % упрочняющей $\gamma'$-фазы, закалочное охлаждение не может полностью подавить распад пересыщенного $\gamma$-раствора. В структуре материала даже после ускоренного охлаждения уже присутствуют выделения $\gamma'$-фазы размером от 30 до 80 нм. Такую термообработку правильно было бы называть обработкой на твердый раствор (solution heat treatment) с последующим охлаждением, однако термин "закалка" уже прочно укрепился в научной литературе, посвященной этому вопросу.

Значительное преимущество жаропрочных никелевых сплавов, производимых по технологии металлургии гранул – возможность проведения закалки из однофазной области. В аналогичном деформируемом материале из-за растворения частиц $\gamma'$-фазы при нагреве выше сольвуса начинается резкий рост зерна до размера 50 мкм и выше за счет рекристаллизации.

Последнее характерно и для деформируемых жаропрочных никелевых сплавов, изготовляемых из гранул газоструйного распыления расплава (технология "gas atomization"). Например, в исследованиях американских ученых из Glenn Research Center для гранулируемого сплава, полученного распылением аргоном и экструзией, при закалке с температуры на 25 °С ниже

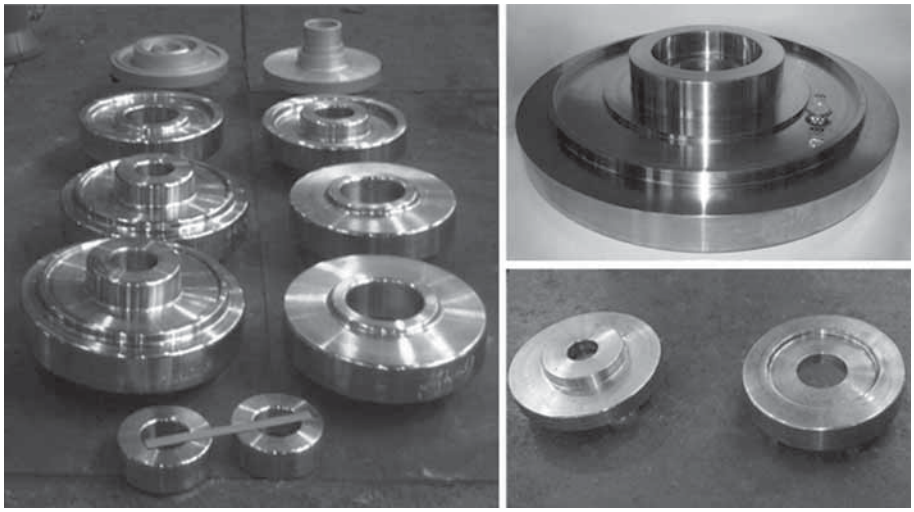


**Рис. 1. Крупногабаритные заготовки дисков, изготовленные из гранул сплава ВВ751П**

и на 10 °С выше сольвуса средний размер зерна составлял 8 и 32 мкм соответственно [6].

Такое изменение зеренной структуры (с балла 11 до 7 по шкале ASTM) существенно снижает прочностные характеристики материала. Высокое значение среднего размера зерна, а также возможность проявления при высокотемпературной обработке газовой пористости не позволяют получить требуемые прочностные свойства.

Производство гранул плазменным распылением быстровращающейся литой заготовки снижает внутригранульную пористость практически до нулевых значений. Это позволяет исключить операцию дополнительной обработки давлением (экструзия, штамповка и т.д.) заготовок дисков после компактирования. Процесс рекристаллизации такого материала при нагреве под закалку идет медленнее, так как степень микродеформации после газостатического прессования составляет не более 10 %, что значительно ниже, чем при традиционной обработке давлением, даже в несколько переходов с промежуточными отжигами. Поэтому рост зерна происходит медленнее, что подтверждается проведенными экспериментами по закалке гранулируемого сплава ВВ751П из двухфазной области: размер зерна при этом составляет 23...27 мкм, а при закалке выше сольвуса – всего на 5...7 мкм больше (рис. 2).

Однако проведение закалки из однофазной области позволяет получить выделения $\gamma'$-фазы более мелкого размера, чем при закалке из двухфазной области. Причина этого заключается в том, что при нагреве выше сольвуса полностью растворяется крупная некогерентная $\gamma'$-фаза, образовавшаяся на предыдущих технологических этапах (выплавка или переплавы, обработка давлением). Рост частиц когерентной $\gamma'$-фазы, несоответствие решеток $\gamma/\gamma'$ для которой крайне мало и составляет ~0,1 %, определяется уже скоростью закалочного охлаждения.

Данная закономерность подтверждается не только теоретически, но и экспериментально. Так, в работе ученых из Rolls-Royse Corporation показано различие в микроструктуре порошковой модификации сплава Udimet 720L при закалке ниже и выше сольвуса [7]. Размер самых крупных частиц $\gamma'$-фазы (в данном случае избыточной) при закалке из двухфазной области в несколько десятков раз превышает аналогичный параметр у материала, термообработанного в однофазной области.

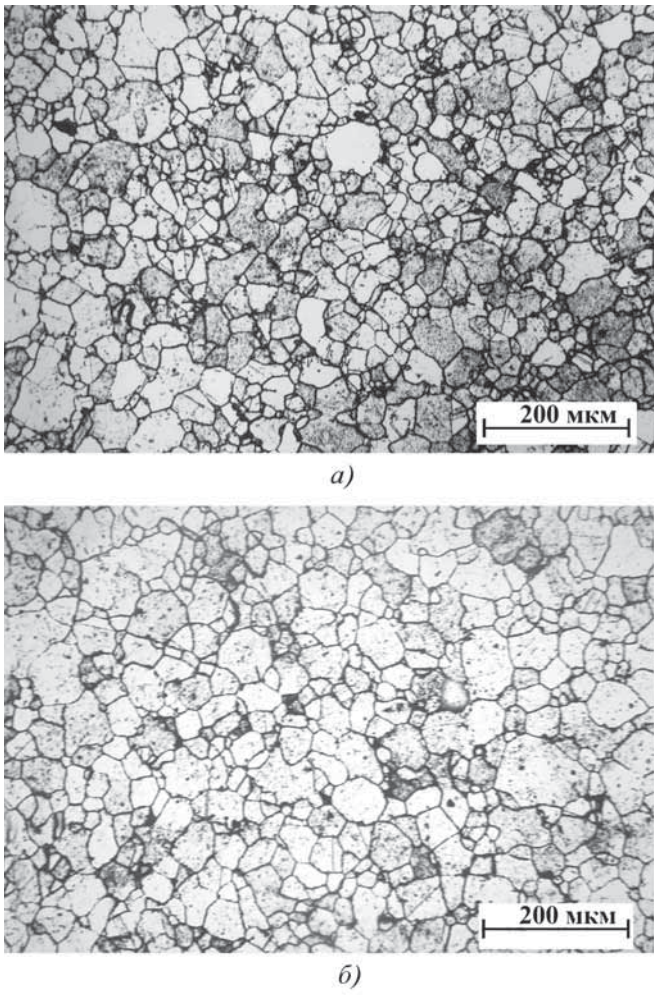



**Рис. 2. Типичная зеренная структура заготовок дисков, обработанных по различным режимам закалки (×100):**
*а* – закалка из двухфазной области; *б* – закалка из однофазной области

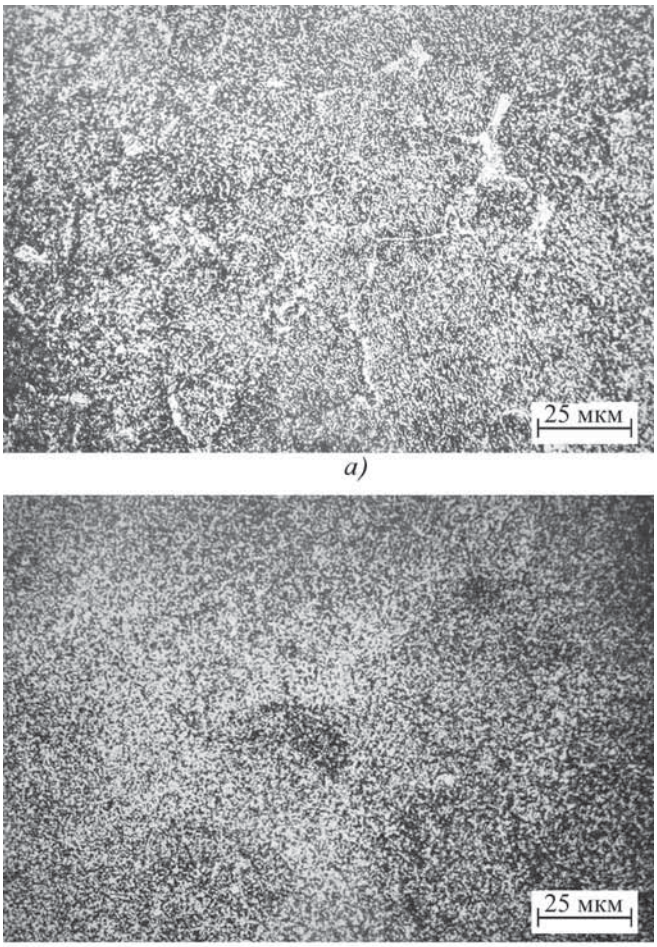



**Рис. 3. Типичная микроструктура заготовок дисков, обработанных по различным режимам закалки, травление на γ′-фазу (×500):**
*а* – закалка из двухфазной области; *б* – закалка из однофазной области

Отсутствие в структуре избыточной γ′-фазы, некогерентной с матрицей сплава, которая практически не участвует в упрочнении материала, определяет высокий уровень механических характеристик материала после закалки выше температуры сольвус. Несмотря на то что при закалке из двухфазной области может быть обеспечен меньший размер зерна, меньшее количество γ′-фазы в виде мелких когерентных частиц участвует в упрочнении сплава, приводит к снижению предела текучести, сопротивления малоцикловой усталости (МЦУ) и длительной прочности при 650 °С.

Следовательно, наиболее важной характеристикой для назначения режима закалки является температура полного растворения γ′-фазы ($T_{п.р}$ или сольвус). Для высокопрочных сплавов, к которым относится гранулируемый жаропрочный никелевый сплав ВВ751П, этот этап термической обработки необходимо проводить только в однофазной области, выше $T_{п.р}$ γ′-фазы.

Однако изменение температуры сольвус от плавки к плавке может приводить к двум нежелательным ситуациям. Во-первых, превышение температуры закалки над сольвусом выше требуемой величины может привести к сильному росту зерна, что в соответствии с законом Холла–Петча приведет к снижению предела текучести. Другой предельный случай, а именно недогрев, приводит к образованию крупных выделений избыточной γ′-фазы (рис. 3, *а*), что также снижает прочностные характеристики материала.

В серийном производстве режим термической обработки жестко регламентируется технологической документацией. При использовании различных плавок, которые могут иметь колебания химического состава и, соответственно, различные критические точки, у материала заготовок дисков может наблюдаться нестабильность механических свойств, даже если отклонения указанных величин от плавки к плавке невелики.

При этом часть значений механических характеристик при контроле такого материала может не соответствовать требованиям, что приводит к необходимости повторных испытаний.

В настоящее время конструкторы перспективных авиационных двигателей уделяют повышенное внимание вопросу стабильности гарантируемого уровня свойств материала [8, 9]. Требуется не только превышение фактических свойств сплава над заданными, но и обеспечение такого значения границы доверительного интервала "–3*S*", которое будет выше норм, указанных в ТУ (рис. 4).

При разработке технологии производства крупногабаритных заготовок дисков из гранул жаропрочного никелевого сплава ВВ751П было уделено повышенное внимание указанному требованию. На этапе отработки технологии были предприняты соответствующие меры, направленные на обеспечение стабильности гарантируемых механических характеристик [10]. Исследование влияния термической обработки, а именно закалки, на свойства полноразмерных загото-

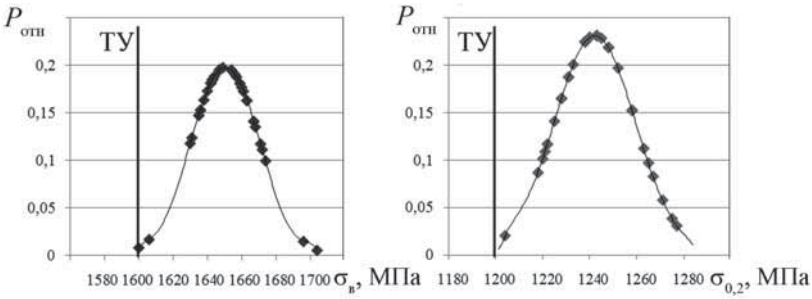



**Рис. 4. Требования к перспективным авиационным материалам (кривая распределения $\sigma_в$ и $\sigma_{0,2}$ с учетом значения "–3*S*" находится выше требований ТУ)**

вок дисков позволило существенно снизить долю материала, имеющего свойства ниже требований ТУ.

Именно обеспечение нагрева сплава при температуре, имеющей точное соответствие с сольвусом (в данном случае выше на определенную величину) необходимо для стабильного и воспроизводимого уровня свойств заготовок дисков. В связи с этим потребовалось разрабатывать режим закалки в соответствии с химическим составом каждой плавки по причине колебания температуры сольвус на величину ~10 °С. Также необходимо было учитывать точность поддержания температуры технологического оборудования (камерных электрических печей для закалки), чтобы обеспечить гарантированное проведение технологических режимов в фазовой области твердого раствора.

Подобный подход, состоящий в приведении режимов термической обработки в соответствии с фактическим составом сплавов, является в определенной степени известным. Подобная проблема описана в работе [11] американских ученых. Предложен метод уменьшения остаточных напряжений при нагреве на температуру, превышающую сольвус на определенную величину. При этом поставлена цель – оставаться как можно ближе к температуре сольвус, чтобы не допустить роста зерна. Поскольку возможны колебания критических точек в зависимости от химического состава материала, для гарантированного попадания в однофазную область и как можно ближе к сольвусу требуется определение температуры полного растворения $\gamma'$-фазы для каждой плавки материала.

Технология термической обработки деформируемого жаропрочного никелевого сплава ЭП742ИД также предусматривает закалку с температуры, равной $T_{п.р}$ $\gamma'$-фазы, и корректировку режимов от плавки к плавке [12]. Однако, по данным автора, для высоколегированных сплавов, содержащих в структуре около 50 % $\gamma'$-фазы, существует опасность оплавления. Кроме того, по мнению авторов статьи, увеличение температуры закалки на деформированном материале может привести к существенному росту зерна вследствие рекристаллизации, что в конечном итоге вызовет снижение прочностных характеристик.

Термическая обработка новых деформируемых сплавов ВЖ175 и ЭП975, а также технология их обработки давлением учитывает колебания значения сольвуса $\gamma'$-фазы [13]. Применяемые экспресс-методы определения критических точек, например, ризистометрирование, позволили внедрить разработанные технологии в серийное производство.

Предлагаемый метод, не требующий сложных регрессионных соотношений для определения точного значения температуры сольвус в зависимости от содержания легирующих элементов, позволяет наиболее просто назначать оптимальную температуру закалки. Он учитывает не только ограниченность температурного интервала гомогенности твердого раствора и возможность проявления перегрева, приводящего к неисправимому браку и значительному снижению механических характеристик. Также необходимость обеспечения очень высоких прочностных свойств требует проводить операцию закалки достаточно близко к сольвусу, что возможно только при использовании гибкой технологии термообработки.

Перечисленные факторы привели к тому, что в технологию производства заготовок дисков из высокопрочного сплава ВВ751П были внесены изменения, предусматривающие определение температур критических точек для каждой плавки и назначение режима закалки в соответствии с полученными данными.

При этом значительно уменьшилась частота появления пониженных значений при контрольных испытаниях. Проведены эксперименты по сравнению свойств после термообработки с закалкой заготовок одинаковых типоразмеров и массы по разработанному режиму и с закалкой вблизи температуры сольвус. В таблице приведены результаты испытаний четырех полноразмерных заготовок дисков (масса в состоянии

**Механические характеристики крупногабаритных заготовок дисков, обработанных по различным режимам закалки**

| Механические свойства при 20 °С | | | | | Жаропрочность при 650 °С ($\sigma$ = 1100 МПа), ч | | МЦУ при 650 °С ($\sigma$ = 1120 МПа, $f$ = 1 Гц) $N$, циклы | Средний размер зерна $d_з$, мкм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_в$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\delta$, % | $\psi$, % | $KC$U, Дж/см$^2$ | $\tau_{глад}$ | $\tau_{надр}$ | | |
| ***Требования ТУ*** | | | | | | | | |
| ≥ 1600 | ≥ 1200 | ≥ 12 | ≥ 13 | ≥ 25 | ≥ 100 | | ≥ 10 000 | – |
| ***Закалка из двухфазной области*** | | | | | | | | |
| 1632 | 1181 | 19,2 | 17,8 | 32 | 84 | 110 | 26 700 | 26 |
| 1615 | 1188 | 18,4 | 16,0 | 32 | 90 | 106 | 8520 | |
| 1608 | 1157 | 19,6 | 17,8 | 37 | 43 | 120 | 28 100 | 27 |
| 1632 | 1162 | 21,2 | 19,6 | 37 | 65 | 135 | 5230 | |

| Механические свойства при 20 °С | | | | | Жаропрочность при 650 °С ($\sigma$ = 1100 МПа), ч | | МЦУ при 650 °С ($\sigma$ = 1120 МПа, $f$ = 1 Гц) $N$, циклы | Средний размер зерна $d_з$, мкм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_в$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\delta$, % | $\psi$, % | $KCU$, Дж/см$^2$ | $\tau_{глад}$ | $\tau_{надр}$ | | |
| ***Закалка из однофазной области*** | | | | | | | | |
| 1615 | 1223 | 14,8 | 13,5 | 25 | 553 | 173 | 55 440 | 30 |
| 1640 | 1213 | 16,0 | 14,5 | 26 | 555 | 175 | 26 640 | |
| 1648 | 1232 | 18,4 | 18,3 | 29 | 122 | 289 | 26 820 | 32 |
| 1629 | 1218 | 18,4 | 19,3 | 33 | 119 | 174 | 16 920 | |

поставки около 100 кг) с различными режимами закалки.

Показано, что в результате проведенной оптимизации технологии термической обработки средний уровень $\sigma_{0,2}$ материала крупногабаритных заготовок дисков повысился на 25...50 МПа, сузился разброс значений. Микроструктура в различных зонах заготовок при этом не содержит следов избыточной $\gamma'$-фазы, что определяет высокий уровень прочностных свойств, длительной прочности и сопротивления МЦУ при 650 °С.

Работы по повышению стабильности свойств продолжаются, что позволяет обеспечивать конструкторов газотурбинных двигателей заготовками дисков с уникальным комплексом свойств, который при прочих равных условиях (габаритные размеры заготовок, стоимость, коэффициент использования металла) очень трудно получить с применением технологии деформации слитка.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **ГОСТ Р 52802–2007.** Сплавы никелевые жаропрочные гранулируемые. Марки. М.: Стандартинформ, 2006. 10 с.

2. **Разработка** новых гранулированных жаропрочных сплавов для производства дисков и валов авиационных двигателей / Г.С. Гарибов, А.В. Востриков, Н.М. Гриц, Е.А. Федоренко // Технология легких сплавов. 2010. № 2. С. 34–49.

3. **Пат. 2368683 РФ.** Порошковый жаропрочный никелевый сплав / Г.С. Гарибов, А.В. Востриков, Н.М. Гриц и др. Опубл. 27.09.2009.

4. **Пат. 2453398 РФ.** Способ получения изделия из сплава типа ВВ751П с высокой прочностью и жаропрочностью / Г.С. Гарибов, А.В. Востриков, Н.М. Гриц и др. Опубл. 20.06.2012.

5. **Меркулова Г.А.** Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. 312 с.

6. **Gayda G., Gabb T., Kantzos P.** The Effect of Dual Microstructure Heat Treatment on an Advanced Nickel-Base Alloy // Superalloys 2004. USA, Warrendale PA, TMS. P. 323–329.

7. **Jain S.K., Ewing B.A., Yin C.A.** The Development of Improved Performance PM Udimet 720 Turbine Disks // Superalloys 2000. USA, Warrendale PA, TMS. P. 785–794.

8. **Ножницкий Ю.А.** Проблемы применения гранулируемых сплавов в перспективных ГТД // Технология легких сплавов. 2007. № 4. С. 13–20.

9. **Востриков А.В., Гарибов Г.С.** Исследование влияния масштабного фактора на механические свойства заготовок дисков для ГТУ, полученных методом металлургии гранул // Газотурбинные технологии. 2006. № 3 (46). С. 34–37.

10. **Освоение** перспективного высокопрочного гранулируемого никелевого сплава при производстве заготовок турбинных дисков для авиационных двигателей нового поколения / Г.С. Гарибов, Н.М. Гриц, А.В. Востриков, Е.А. Федоренко, А.М. Волков // Технология легких сплавов. 2012. № 3. С. 50–62.

11. **Пат. US 7138020 B2.** Method for Reducing Heat Treatment Residuial Stresses in Super-Solvus Solutioned Nickel-Base Superalloy Articles / J. Groh, S. Srivatsa. 2006.

12. **Ломберг Б.С.** Жаропрочные сплавы для высоконагруженных дисков газотурбинных двигателей (ГТД) // Всероссийская научная школа для молодежи "Материалы и энергосберегающие технологии для производства ответственных деталей высокоэффективных газотурбинных двигателей, промышленных энергетических силовых установок и приводов". М.: ВИАМ, 2010. С. 41–48.

13. **Овсепян С.В.** Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Всероссийская научная школа для молодежи "Материалы и энергосберегающие технологии для производства ответственных деталей высокоэффективных газотурбинных двигателей, промышленных энергетических силовых установок и приводов". М.: ВИАМ, 2010. С. 92–98.



*Александр Максимович Волков,*
volkovms@rambler.ru;
*Генрих Саркисович Гарибов, д-р техн. наук*

УДК 621.735.32:621.882

**В.В. Галкин, Е.Г. Терещенко, А.А. Дербенев*, С.В. Кошелев**
*(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,*
** ОАО "Нижегородский авиастроительный завод "Сокол")*

# К вопросу о построении диаграмм рекристаллизации металла

*Предложено усовершенствование методики построения диаграмм рекристаллизации металла с помощью программных продуктов, что уменьшает число выполнения необходимых экспериментов, позволяет определять деформированное состояние металла и проводить обсчет размеров его структурных составляющих на цифровых фотографиях микроструктур, полученных на шлифах в конкретных объемах заготовки.*

**Ключевые слова:** диаграмма рекристаллизации металла; степень деформации; размер зерна; температура горячей обработки металла.

*Improvement of technique of construction of metal recrystallization curves by means of software products is offered that reduces number of performance of necessary experiments, allows to define the deformed condition of metal and to calculate the sizes of its structural components in digital photographs of the microstructures received on section metallographic specimens in concrete volumes of blanks.*

**Keywords:** metal recrystallization curves; deformation rate; grain size; temperature of metal hot processing.

Построение диаграмм рекристаллизации металла осуществляют на основе специальных экспериментов в условиях горячей обработки давлением, при которой происходят возврат и рекристаллизация. В чистых металлах это происходит при температурах свыше (0,25...0,30)*T*. Диаграммы являются принадлежностью конкретного исследуемого металла и дают информацию об изменении размера его зерна в зависимости от степени деформации.

По мнению В. Бэкофена, "размер зерна представляет тот структурный параметр, который легче всего выделить и который может установить аналитические соотношения между структурой и свойствами", что позволяет косвенным образом оценить механические характеристики и служебные свойства материала.

В промышленном производстве используют данные научно-технической литературы, в частности справочник М.Л. Бернштейна [1]. До настоящего времени методика построения диаграмм рекристаллизации достаточно трудоемка.

Все изложенное выше свидетельствует об актуальности усовершенствования методики построения диаграмм рекристаллизации в направлении уменьшения числа необходимых экспериментов и снижения их трудоемкости.

Для достижения поставленной цели было определено решение следующих задач: выбор вида испытания, методов оценки деформированного состояния и замера структурных составляющих металла.

В качестве испытания для построения диаграмм рекристаллизации выбрана операция осадки штучной заготовки в торец. При осадке в ее объеме имеет место неравномерность деформированного состояния материала в виде зон с различной интенсивностью деформации: по торцу деформация практически отсутствует, а зона наибольшей интенсивности деформации имеет форму "ковочного креста" с "ядром" деформации по ее центру при относительной длине осаживаемой заготовки 2...2,5. Это позволяет при микроструктурном анализе шлифа, изготовленного по среднему продольному сечению заготовки, осаженной при конкретной температуре, получить зависимости изменения размера структурных составляющих, в частности размера зерна, от степени деформации в интервале от нуля до максимума.

Расположение исследуемых зон в исходной заготовке можно задать координатной сеткой, а их перемещение при осадке проследить с помощью программных продуктов, имеющих возможность анализировать деформированное состояние. Совокупность испытаний металла в интервале температур рекристаллизации позволяет построить ее объемную диаграмму.

Решение последующих задач выполняли на основе использования программных продуктов, позволяющих обсчитывать цифровые фотографии микроструктур, полученных со шлифов в конкретных объемах заготовки.

В настоящей работе применяли программу, разработанную на платформе "LabVIEW" компании National Instruments [2]. Исходное цифровое изображение микроструктуры, полученное с микроскопа, подвергается бинаризации, в результате которой элементы изображения разделяются на объекты – зерна и фон (рис. 1). Далее при использовании встроенной функции пакета "NI Vision", основанной на многократном применении операции эрозии к объектам изображения, проводится дополнительная сегмен-

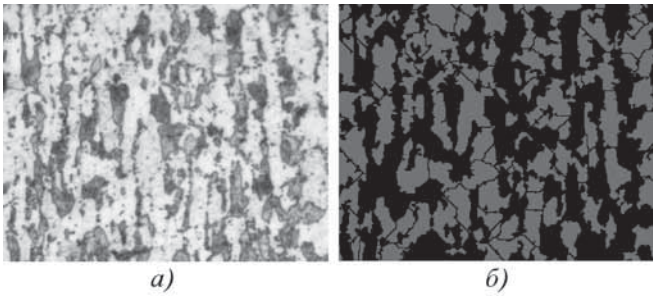



**Рис. 1. Исходная (*а*) и бинаризованная (*б*) микроструктуры стали**

тация изображения, при которой исчезают узкие перешейки, соединяющие отдельные зерна.

Для оценки интенсивности деформации в объеме осаженной заготовки наиболее рационально применение метода структурного анализа Г.А. Смирнова-Аляева, также основанного на замере структурных составляющих металла на шлифе в конкретной зоне и позволяющего рассчитывать компоненты ее деформированного состояния, в частности интенсивность деформированного состояния.

Изложенная методика была апробирована при построении диаграмм рекристаллизации горячекатаного прутка из стали 35. Из него изготовляли образцы длиной 28 мм, при этом относительная длина заготовки равна 2. Осадку осуществляли на гидравлическом прессе со скоростью движения ползуна 0,2 м/с при температурах 20; 700; 800 и 900 °С. Расположение исследуемых зон в исходной заготовке приведено на рис. 2, *а*, а их расположение после осадки на шлифах для структурного анализа (рис. 2, *б*) было определено с применением программного комплекса "DEFORM-3D".

Результаты расчетов интенсивности деформированного состояния $\varepsilon_i$, средних размеров зерен $a_x$, $a_y$ по горизонтальной и вертикальной составляющим и средней площади их поперечного сечения $S_{ср}$ при различных температурах испытания в 13 выбранных зонах приведены в таблице.

Полученные результаты свидетельствуют о следующем: во-первых, максимальный размер зерна, определяемый как его средняя площадь $S_{ср}$, соответствует центральной зоне осаженных заготовок (см. рис. 2, точки 4, 5, 6 и 11). С увеличением температуры $S_{ср}$ возрастает и при температурах 700, 800 и 900 °С составляет 54 689, 78 069 и 91 648 мкм$^2$ соответственно. Это свидетельствует о повышении интенсивности рекристаллизационных процессов металла с увеличением температуры, при этом их расположение по объему осаженной заготовки соответствует расположению зоны наибольшей интенсивности деформации при осадке.

Во-вторых, построенные зависимости (рис. 3) показали, что с повышением температуры степень деформации, при которой интенсивность рекристаллизационных процессов максимальна, уменьшается. При температурах 700; 800 и 900 °С интенсивность деформированного состояния равна 0,75; 0,3 и 0,5 соответственно.

Зависимости, приведенные на рис. 3, подобны применяемым диаграммам рекристаллизации в координатах "степень деформации – размер зерна" и по совокупности позволяют построить объемную диаграмму для конкретного металла с учетом различной структуры исходной заготовки по сечению.

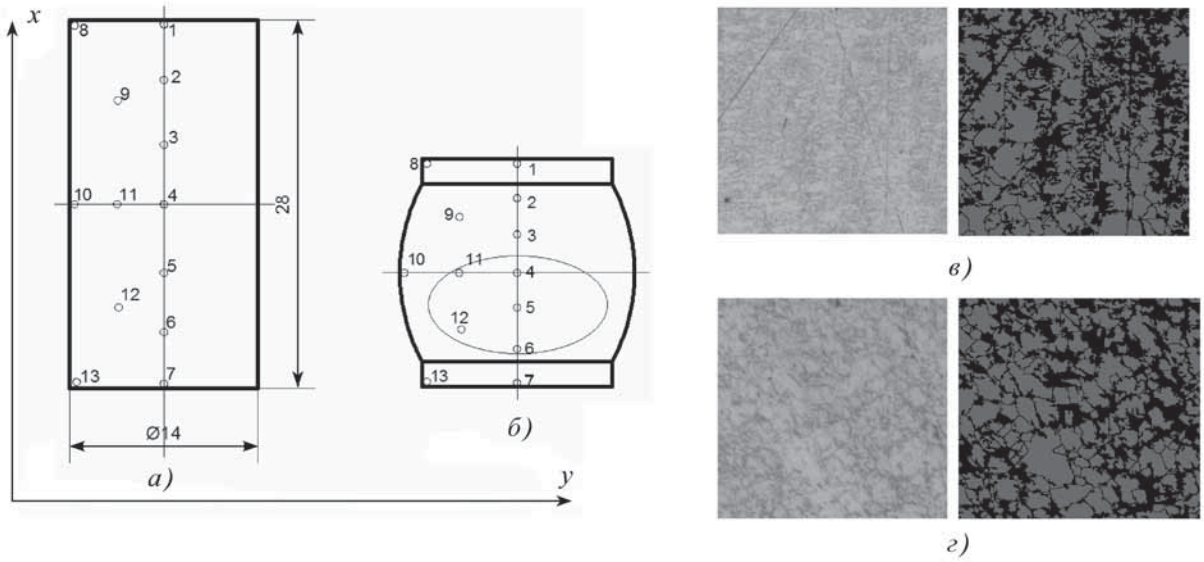



**Рис. 2. Исследуемые зоны исходной (*а*) и осаженной (*б*) заготовок и исходная и бинаризованная микроструктуры:**
*в* – с минимальной средней площадью зерна 22 447 мкм$^2$; *г* – с максимальной средней площадью зерна 91 648 мкм$^2$; 1 – 13 – номера исследуемых зон

**Результаты расчетов**

| Номер зоны | $\varepsilon_i$ | $a_x$ | $a_y$ | $S_{ср}$, мкм$^2$ | $a_x$ | $a_y$ | $S_{ср}$, мкм$^2$ | $a_x$ | $a_y$ | $S_{ср}$, мкм$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | мкм | | | мкм | | | мкм | | |
| | | до деформации | | | при температуре испытания, °С | | | | | |
| | | | | | 20 | | | 700 | | |
| 1 | 0,856 | 449,016 | 80,348 | 28 321 | 380,752 | 109,604 | 32 759 | 371,00 | 107,908 | 31 427 |
| 2 | 0,690 | 286,624 | 105,788 | 23 802 | 402,588 | 136,528 | 43 147 | 392,624 | 104,94 | 32 344 |
| 3 | 0,656 | 308,46 | 129,956 | 31 468 | 576,428 | 86,284 | 39 043 | 379,056 | 96,672 | 28 766 |
| 4 | 0,641 | 366,124 | 110,876 | 31 867 | 384,992 | 102,608 | 31 010 | 411,068 | 79,288 | 25 585 |
| 5 | 0,209 | 358,492 | 86,284 | 24 282 | 419,124 | 128,472 | 42 268 | 567,736 | 115,964 | 51 682 |
| 6 | 0,532 | 382,872 | 126,988 | 38 167 | 309,308 | 112,784 | 27 384 | 503,076 | 121,688 | 48 056 |
| 7 | 0,623 | 568,796 | 86,496 | 38 621 | 306,128 | 106,424 | 25 574 | 329,448 | 118,084 | 30 538 |
| 8 | 0,939 | 264,576 | 108,12 | 22 456 | 576,428 | 69,536 | 31 464 | 440,748 | 112,996 | 39 095 |
| 9 | 0,274 | 307,188 | 104,304 | 25 152 | 316,728 | 90,312 | 22 454 | 341,32 | 124,02 | 33 229 |
| 10 | 0,471 | 319,06 | 131,016 | 32 815 | 302,10 | 111,724 | 26 495 | 474,88 | 113,208 | 42 202 |
| 11 | 1,051 | 567,524 | 180,412 | 80 375 | 351,708 | 69,112 | 19 081 | 449,016 | 115,964 | 40 875 |
| 12 | 0,616 | 507,952 | 113,844 | 45 394 | 441,808 | 108,756 | 37 718 | 587,876 | 118,508 | 54 689 |
| 13 | 0,547 | 370,576 | 81,832 | 23 805 | 313,124 | 113,208 | 27 826 | 380,456 | 91,796 | 41,828 |

| Номер зоны | $\varepsilon_i$ | $a_x$ | $a_y$ | $S_{ср}$, мкм$^2$ | $a_x$ | $a_y$ | $S_{ср}$, мкм$^2$ | $a_x$ | $a_y$ | $S_{ср}$, мкм$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | мкм | | | мкм | | | мкм | | |
| | | до деформации | | | при температуре испытания, °С | | | | | |
| | | | | | 800 | | | 900 | | |
| 1 | 0,856 | 449,016 | 80,348 | 28 321 | 425,908 | 90,1 | 30 124 | 295,74 | 110,24 | 25 593 |
| 2 | 0,690 | 286,624 | 105,788 | 23 802 | 306,552 | 93,28 | 22 447 | 352,132 | 133,348 | 36 861 |
| 3 | 0,656 | 308,46 | 129,956 | 31 468 | 467,036 | 99,216 | 36 375 | 689,636 | 92,856 | 50 269 |
| 4 | 0,641 | 366,124 | 110,876 | 31 867 | 595,084 | 81,832 | 38 227 | 402,376 | 130,804 | 41 316 |
| 5 | 0,209 | 358,492 | 86,284 | 24 282 | 499,896 | 66,356 | 26 039 | 607,168 | 192,284 | 91 648 |
| 6 | 0,532 | 382,872 | 126,988 | 38 167 | 569,856 | 120,416 | 53 867 | 518,976 | 82,68 | 33 684 |
| 7 | 0,623 | 568,796 | 86,496 | 38 621 | 302,948 | 109,604 | 26 065 | 321,816 | 103,032 | 26 029 |
| 8 | 0,939 | 264,576 | 108,12 | 22 456 | 345,984 | 86,072 | 23 377 | 321,816 | 103,032 | 26 029 |
| 9 | 0,274 | 307,188 | 104,304 | 25 152 | 316,092 | 235,744 | 58 496 | 401,316 | 79,924 | 25 179 |
| 10 | 0,471 | 319,06 | 131,016 | 32 815 | 534,452 | 85,648 | 35 933 | 362,944 | 80,348 | 22 892 |
| 11 | 1,051 | 567,524 | 180,412 | 80 375 | 403,012 | 246,768 | 78 069 | 478,696 | 104,092 | 39 115 |
| 12 | 0,616 | 507,952 | 113,844 | 45 394 | 408,524 | 142,888 | 45 823 | 556,924 | 123,384 | 53 942 |
| 13 | 0,547 | 370,576 | 81,832 | 23 805 | 341,744 | 102,184 | 27 413 | 538,692 | 134,832 | 57 017 |

Они более реально оценивают протекание рекристаллизационных процессов в зависимости от температуры и степени деформации, так как в качестве показателя деформации используется значение интенсивности деформированного состояния, а в качестве размера структурной составляющей – средняя площадь зерна.

**Заключение.** Для усовершенствования методики построения объемных диаграмм рекристаллизации предложены следующие процедуры:

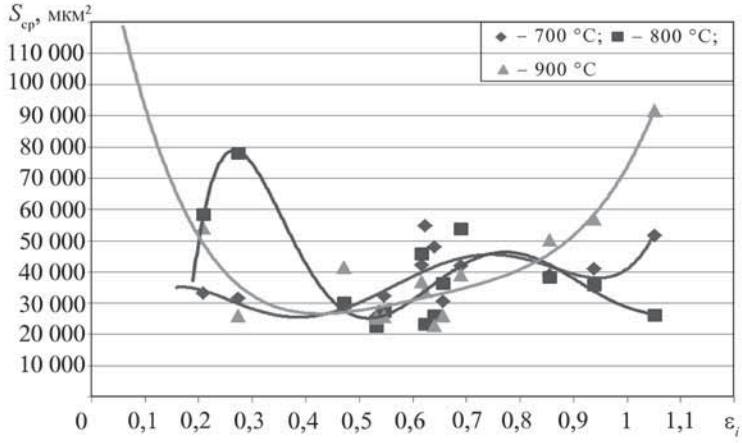



**Рис. 3. Зависимости средней площади зерна $S_{ср}$ от интенсивности деформированного состояния $\varepsilon_i$ при различных температурах**

– осадка штучных заготовок в торец в интервале температур рекристаллизации;

– обозначение координатной сетки исследуемых зон по продольному сечению исходной заготовки и определение их положения в осаженной заготовке с помощью математического моделирования;

– определение значений интенсивности деформации материала в исследуемых точках осаженной заготовки согласно структурному методу А.Г. Смирнова-Аляева;

– замеры структурных составляющих на шлифах продольного сечения в исследуемых точках исходной заготовки при комнатной температуре и осаженных при температурах испытания с помощью программных продуктов;

– построение объемных диаграмм рекристаллизации в координатах "интенсивность деформированного состояния – средняя площадь зерна".

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бернштейн М.Л.** Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей. М.: Металлургия, 1989. 344 с.

2. **Галкин В.В., Кудрявцев С.А., Терещенко Е.Г.** Развитие микроструктурного метода исследования конечных пластических деформаций // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 2. С. 22–24.

*Владимир Викторович Галкин, канд. техн. наук,* lumi1950@mail.ru;
*Елена Григорьевна Терещенко;*
*Андрей Анатольевич Дербенев;*
*Сергей Викторович Кошелев*

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

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

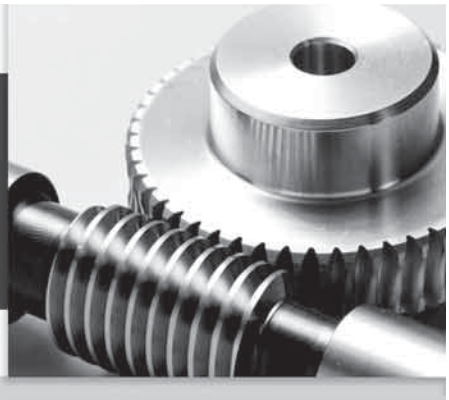
**Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:**

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

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

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ



Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов

**ПРИПУСКИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ**

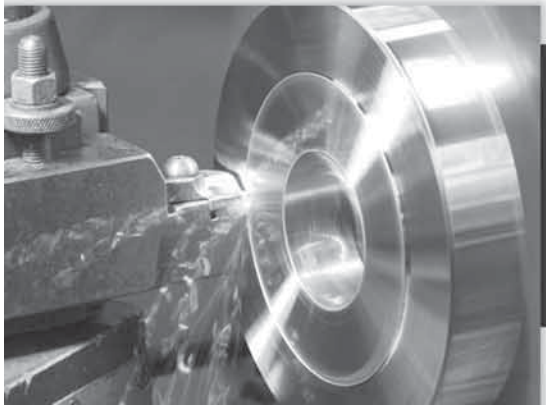
2013 г. Объем 256 с.

Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-607-9

**Цена 800 р.**

Приведены нормативные материалы, необходимые технологу-машиностроителю для расчета и выбора припусков на механическую обработку, даны рекомендации по выбору вида заготовок, составлению маршрута обработки, нормы точности, а также операционные припуски на обработку различных поверхностей деталей.

Для инженеров-технологов заводов, проектно-конструкторских организаций, а также может быть полезна преподавателям и студентам вузов.



**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

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

# Поздравляем!

## Николая Александровича Шестакова,

**д-ра техн. наук, профессора**

## с 65-летием

Николай Александрович Шестаков родился 12 марта 1948 г. в поселке Подюга Архангельской области.

В 1971 г. он с отличием окончил Московский автомеханический институт (в настоящее время Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)) и был принят в аспирантуру Московского текстильного института на кафедру "Сопротивление материалов". После окончания аспирантуры был направлен на работу в Центральный институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов МИНТЯЖМАШ, где работал в должности старшего преподавателя до 1979 г. В 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию.

С 1979 г. и по настоящее время работает в Московском государственном индустриальном университете (ранее Завод-втуз при ЗИЛе, а затем МАСИ). В 1981 г. ему было присвоено ученое звание доцента по кафедре "Машины и технология обработки металлов давлением".

В 2005 г. Н.А. Шестаков защитил докторскую диссертацию и ему было присвоено ученое звание профессора.

Многолетняя трудовая деятельность Н.А. Шестакова связана с научно-педагогической деятельностью. Проф. Н.А. Шестаков читает курсы лекций "Теория обработки металлов давлением", "Технология листовой штамповки". Он является автором учебных пособий "Технология ротационной ковки и вальцовки" (издательство "Высшая школа"), "Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad. Решение задач энергетическим методом" (издательство МГИУ). В 2011 г. издательством "Физматлит" выпущена его монография "Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов".

Н.А. Шестаков имеет более 130 научных и учебно-методических работ, в том числе 3 монографии, 7 учебных пособий с грифом Министерства высшего образования РФ, а также 17 авторских свидетельств и патентов РФ. Награжден золотой и серебряной медалями ВДНХ СССР.

Проф. Н.А. Шестаков является деканом Автомобильного факультета МГИУ, членом двух диссертационных советов.

В 2007 г. награжден знаком "Почетный работник высшего профессионального образования", а в 2011 г. удостоен звания лауреата премии правительства РФ в области образования. В 2010 г. в составе авторского коллектива на 5-м Международном конкурсе "Университетская книга–2010" награжден грамотой в номинации "Лучшее учебное издание в области технологий" за книгу "Штампы для листовой штамповки. Штампы простого действия".

Н.А. Шестаков избран действительным членом Академии проблем качества России, является членом редакционного совета нашего журнала.

*Коллектив редакции и редакционный совет журнала "Заготовительные производства в машиностроении" желают Николаю Александровичу крепкого здоровья, благополучия и дальнейшей плодотворной деятельности!*

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 14.01.2013 г. Подписано в печать 22.02.2013 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.