ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 12 декабрь 2008

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

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

Зам. Главного редактора:
КЛЕЙЗЕР П.Е.
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЖЕСТКОВА И.Н.
ЗАРУБИН А.М.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
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 Г.П.
ТРУХОВ А.П.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ДЮБКОВА Н.В.
СЕРИКОВА Е.А.
МАКАРЕНКО Е.Д.
ГАНЖЕНКО А.Г.

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12218 от 29.03.02

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Дубровский С.А., Шипельников А.А., Роготовский А.Н. Наследственные неравновесные структуры в чугунах . . . 3
Юдин А.В. Расчет контура стабилизации скорости кристаллизации в системе автоматического управления установки направленной кристаллизации монокристаллических отливок . . . 7
Рязанцев В.И., Овчинников В.В. Циклическая прочность сварных соединений из алюминиевых сплавов . . . 10
Крайнев А.Ф. Техника литейного производства в историческом и логическом развитии (2-я и 3-я полосы обложки)

Кузнечно-штамповочное производство

Тяжельников В.М., Каплунов Б.Г. Новая технология штамповки полых поковок высоких ступиц . . . 15
Сербин А.Г., Семёнов И.Е. Моделирование процесса вырубки листового металла эластичной средой . . . 19
Петриков С.А. Технология изготовления теплообменных поверхностей в трубах для паровых и водогрейных котлов и теплообменных аппаратов . . . 22
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. Влияние уравновешивающих гидроцилиндров на работу гидравлического ковочного пресса . . . 27

Прокатно-волочильное производство

Сёмин П.В., Сёмин В.А. Определение площади пятна контакта ролика с заготовкой при горячей раскатке дисков из титановых сплавов . . . 32
Филимонов С.В., Филимонов А.В., Филимонов В.И. Конструктивная технологичность гнутых профилей и узлов на их основе . . . 35

Материаловедение и новые материалы

Пучков Ю.А., Нгуен Ш.Х., Ван Яньлун, Березина С.Л., Седова Л.А. Исследование напряженного состояния и коррозионной стойкости пресс-форм из алюминиевых сплавов . . . 41
Пряничников В.А., Герасимов С.А., Сивков В.Л. Высокопрочная теплостойкая сталь многоцелевого назначения для изготовления высоконагруженных деталей машин . . . 45

Информация

Нуждин Г.А., Ляпина Г.И., Самошкин Ю.А., Асанов Г.Н. Вопросы внедрения системы менеджмента качества предприятия . . . 49
Гуревич Ю.Г. Использование отходов коррозионно-стойкой стали для изготовления карбидостали TiC–X18H10T . . . 53

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

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", 2008

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 12 December 2008

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

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

Editorial Assistants:
KLEYZER P.E.
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
ZHESTKOVA I.N.
ZARUBIN A.M.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
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 G.P.
TRUKHOV A.P.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialists:
DYUBKOVA N.V.
SERIKOVA E.A.
MAKARENKO E.D.
GANZHENKO A.G.

Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-12218 from 29.03.02

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

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Dubrovsky S.A., Shipelnikov A.A., Rogotovsky A.N. Arborescent heredity charge of materials . . . 3
Yudin A.V. Calculation of stabilization contour of crystallization rate in automatic control system of installation of the directed crystallization monocrystal moldings . . . 7
Ryazantsev V.I., Ovchinnikov V.V. Cyclic strength of welded connections from the aluminum alloys . . . 10
Krainev A.F. Technique of casting production in historical and logical evolution (2-nd and 3-d pages of cover)

Forging and Stamping Productions

Tyazhelnikov V.M., Kaplunov B.G. New technology of stamping hammer hollow forged piece high naves . . . 15
Serbin A.G., Semenov I.E. Modeling of the process slashing the sheet metal by rubber-band ambience . . . 19
Petrikov S.A. Manufacturing techniques heat exchanging surfaces in pipes for steam and water-heating coppers and heat exchanging devices . . . 22
Goydo M.E., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M. Counterbalancing hydraulic cylinder's effect on operation of hydraulic press . . . 27

Rolling and Drawing Productions

Semin P.V., Semin V.A. Definition of the contact patch area of roller with blank upon hot rolling of disks made of titanium alloys . . . 32
Filimonov S.V., Filimonov A.V., Filimonov V.I. Structural manufacturability of roll-formed profiles and assemblies on their basis . . . 35

Physical Metallurgy and New Materials

Puchkov Yu.A., Nguen Sh.Kh., Van Yanlun, Berezina S.L., Sedova L.A. Research of stress state and corrosion resistance of moulds produced from aluminium alloys . . 41
Pryanichnikov V.A., Gerasimov S.A., Sivkov V.L. High-strength heat-resisting steel of multipurpose function for manufacturing high-loaded parts of machines . . . 45

Information

Nuzhdin G.A., Lyapina G.I., Samoshkin Yu.A., Asanov G.N. Enterprise quality system implementation questions . . . 49
Gurevich Yu.G. Use of corrosion-resistant steel waste for production of steel TiC–Kh18N10T . . . 53

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", 2008

УДК 669.187

С.А. Дубровский, А.А. Шипельников, А.Н. Роготовский
(Липецкий государственный технический университет)

Наследственные неравновесные структуры в чугунах

Рассмотрены проблемы структурной наследственности литейных сплавов в металлургическом производстве с точки зрения неравновесного структурообразования при различных скоростях охлаждения. Предложена методика металлургической экспертизы качества чушковых чугунов, которая позволяет установить некоторые наследственные дефекты структуры конструкционных сплавов.

In operation problems of structural heredity of casting alloys in metallurgical manufacture from the point of view of nonequilibrium structurization are considered at various velocities of refrigeration. The procedure of metallurgical examination of cold pig irons quality which allows to determine some hereditary flaws of constructional alloys structure is offered.

Ключевые слова: структурная наследственность; литейные сплавы; неравновесное структурообразование; металлургическая экспертиза; эксплуатационные свойства.

Key words: structural heredity; casting alloys; nonequilibrium structurization; metallurgical examination; operational properties.

Неравновесное структурообразование в промышленных сплавах оказывает решающее воздействие на эксплуатационные свойства изделий машиностроения. Классический подход к изучению проблем структурообразования сплавов черной металлургии не в состоянии объяснить ряд возникающих проблем, связанных с качеством металлопродукции и влиянием различных стадий металлургического передела на изменение свойств готовых изделий.

В настоящее время нет единой теории структурообразования и состояния металлургических расплавов вблизи температуры кристаллизации. Наблюдаемая в практике металлургического производства химико-структурная наследственность свойств шихтовых материалов пока не имеет четкого математического описания, но именно данное явление из-за несовершенства существующих технологий оказывает решающую роль в структурообразовании сплавов, которая проявляется в формировании различных видов дефектов на макро- и микроуровнях структурной организации [1–3].

Дефекты литой структуры сплавов, в частности, конструкционных чугунов, оказывают сильное влияние на механические и физико-химические свойства деталей механизмов и машин. Современный рынок машиностроения более чем на 60 % представлен фасонными отливками из конструкционных чугунов, что, несомненно, актуализирует поиск новых высокоэффективных технологических операций для частичного или полного устранения наследственных дефектов структуры.

Любые дефекты литой структуры в той или иной мере зависят от протекания процесса неравновесной кристаллизации сплавов. При охлаждении расплава химический состав твердой фазы и жидкости непрерывно изменяется в зависимости от продвижения и конфигурации фронта кристаллизации, что неизбежно приводит к ликвационным явлениям при структурообразовании. Структура в процессе неравновесного затвердевания будет однородной только в том случае, если процессы диффузии элементов не отстают от кристаллизации, что в реальных условиях практически не выполняется [4].

Поэтому анализ процессов неравновесного структурообразования при различных скоростях охлаждения сплавов в сочетании с исследованием хими-

ко-структурной наследственности шихтовых материалов позволит разрабатывать эффективные технологии управления качеством металлопродукции.

Целью исследования является определение влияния скорости охлаждения чугунов на проявления наследственных дефектов структуры.

Основные задачи исследования:

- разработка методики проведения металлургической экспертизы качества литейных чугунов;
- диагностика дефектов структуры;
- анализ изменений в структуре в зависимости от скорости охлаждения чугунов.

Конструкционные чугуны выплавляли в индукционной печи ИСТ 0,4 с кислой футеровкой. Пробы чугунов для металлографического анализа заливались в клиновые песчаные формы (тепловая сушка) с температурами от 1573 до 1923 К с шагом 50 К, время выдержки с постоянной температурой изменяли от 15 до 20 мин.

При использовании различных доменных литейных чугунов температуру печной выдержки варьировали от 1653 до 1673 К.

Металлографический анализ структуры осуществляли на темплетах из клиновых проб, охлаждаемых с расчетной скоростью 10 и 30 К/с, с помощью оптического микроскопа "Olimpus" GX51 (с увеличением от 50 до 1000 раз). Химический состав чугунов контролировали по кокильным образцам на спектральной установке "ARL-3440". Испытание чугунов на прочность осуществляли на разрывной машине ГСЛ-20. Поверхностную твердость проб определяли на твердомере ТК-2М (по Бринеллю).

Использовали передельные литейные чугуны (П1 и ПЛ1 группы I, класса А, категории 1) и литейные чушковые чугуны (Л5, группы II, класса А, категории 1). Время опытных плавок составляло 80... 100 мин. При индукционном переплаве литейных чугунов проводили печное легирование ферромарганцем ФМн78 и ферросилицием ФС45. Температуру чугунов замеряли погружной термопарой "Дижитемп" (тип "S").

Сущность методики металлографической экспертизы качества чушковых литейных чугунов состоит в том, что микроструктурному анализу подвергают темплет исходного чугуна при увеличении 100 (для выявления морфологии графита, отбела и газоусадочных дефектов), 500 и 1000 раз (для выявления морфологии дендритного расположения графита и аустенита, оценки неметаллических включений) на оптическом микроскопе в травленом (4%-ный раствор HNO_3) и нетравленом виде.

После этого темплет переплавляют без доступа кислорода. При достижении расплавом заданной температуры (1573; 1623...1923 К) пробу заливают в песчаную сухую форму (наиболее предпочтительна клиновая проба на отбел, так как в этом случае выявляются морфология включений графита и тип матрицы в зависимости от скорости охлаждения).

Затем оставшуюся часть расплава подвергают микролегированию (обычно кремнием (0,1 % ФС45) и марганцем (0,05 % ФМн78), т.е. теми элементами, которые действуют на активность углерода в строго противоположных направлениях в соотношении 1:1) и выдержке в течение 15...25 мин при заданной температуре, после чего заливают пробу для подготовки темплета для металлографического анализа. Металлографический анализ и пробоподготовку темплета осуществляют согласно ГОСТ 3443–87.

С помощью металлографической экспертизы установлены дефекты структуры литых конструкционных чугунов, подвергнутых микролегированию Mn и Si (табл. 1).

Рассмотрим более подробно причины образования основных дефектов.

1. Основные дефекты микроструктуры исследованных конструкционных чугунов

Дефект	Краткое описание микроструктуры	Эксплуатационные свойства
Междендритный и точечный графит	Колонии точечных включений графита с характерным дендритным расположением	Предел прочности более 180 МПа; твердость более 200 НВ; "выкрашивание" графитовых включений
Сквозная дендритизация матрицы	Конгломераты колоний мелких и крупных дендритов аустенита	Предел прочности менее 160 МПа; твердость более 200 НВ; скалывание; анизотропия
Спелеобразный графит	Крупные (более 200 мкм) единичные образования с выделениями газа по границам включений	В зоне включений хрупкое разрушение; твердость менее 150 НВ
Отбел структуры*	Ледебуритно-цементитная структура	Предел прочности более 250 МПа; твердость более 400 НВ
Неоднородность матрицы	Неравномерность структуры по количеству и качеству перлита, феррита, аустенита	Резкая анизотропия свойств; склонность к образованию холодных трещин
Микропористость	Газовые микрораковины (до 50 мкм) в зоне крупных включений графита (до 360 мкм)	Пониженная твердость и прочность; низкая герметичность
Неметаллические включения	Шлаковые включения, сульфиды, нитриды	Пониженная ударная вязкость, пластичность

* – наследственный дефект в случае соблюдения технологического процесса.

Междендритный и точечный графит и сквозную дендритизацию матрицы наблюдали в пробах конструкционных чугунов, если расплав подвергался низкой температуре выдержки (менее 1673 К) в печи и заливке в литейную форму при температуре более 1723 К, при использовании в шихте ледебуритных (белых) и серых доменных чугунов, а также при соблюдении температурных режимов, но использовании в шихте белых чугунов, пораженных дендритной ликвацией по большей части макроструктуры, которая оценивается по виду излома чушек.

Данные дефекты по причине образования можно отнести одновременно к технологическим и наследственным.

Спелеобразный графит наблюдали в пробах чугунов, полученных путем индукционного переплава серых доменных чугунов, пораженных графитовой спелью, при температурах выдержки расплава 1723...1773 К, а также в пробах, полученных после введения карбюратора (коксовая мелочь, кристаллический графит) в количестве 0,2...0,4 %, если общее содержание углерода по первой пробе составляло не менее 3,5 %.

Так как указанные температуры являются рабочими и практически наиболее достижимыми в производственной практике при сохранении приемлемой стойкости футеровки, то данный дефект отнесен к наследственным.

Неоднородность матрицы – сочетание в пределах одной отливки зон с предотбеленным состоянием, пластинчатого феррита, крупнозернистого перлита и крупного (более 360 мкм) пластинчатого, вермикулярного и реже шаровидного графита, наблюдали в пробах чугунов, полученных после переплава половинчатых доменных чугунов, если температура выдержки не превышала 1673 К, а скорость охлаждения отливок составляла не менее 30 К/с.

Подобный дефект характерен для серых изотропных перлитных чугунов при несоблюдении режима модифицирования (небрежный ввод модификатора на дно ковша, малое количество добавки для определенной номенклатуры отливок и т.п.). Поэтому данный дефект отнесен к технологическим и наследственным.

Отбел структуры происходит либо при нарушении режимов модифицирования и выплавки (длительная выдержка в печи при температурах более 1773 К), либо при использовании белых доменных чугунов без введения карбюраторов, если общее содержание углерода по первой печной пробе составляет 3,4...3,6 %, т.е. то количество, которое должно быть в готовой отливке.

Дефект отнесен как к технологическим, так и к наследственным, если соблюдена технология выплавки и модифицирования.

Микропористость и неметаллические включения в отливках наблюдали в пробах чугунов, отобранных с плавок, в которых стойкость кислой футеровки составляла более 100 плавок, а также использовались твердые шлаковые смеси с преобладанием оксида алюминия при общем количестве шлака менее 2 % от массы расплава и плохо просушенные модификаторы.

Необходимо отметить, что данные дефекты отнесены к технологическим, хотя существует мнение некоторых исследователей о "физической" наследственности доменных чугунов, загрязненных шлаковыми включениями системы Al_2O_3–SiO_2–FeO и содержащими растворенные газы (в основном водород и азот) в количестве до 70 см^3/100 г чугуна. Однако с учетом современного развития доменного производства и применительно именно к литейным чушковым чугунам авторам статьи это мнение кажется сомнительным.

Практически все дефекты (кроме неметаллических включений) либо снижают прочностные характеристики матрицы, либо существенно увеличивают твердость, что приводит к необходимости применения дорогостоящей термической обработки, что в свою очередь провоцирует появление неустранимых видов брака (например, спелеобразный графит отжига).

Методы устранения дефектов структуры заложены в природе их происхождения, что достаточно точно можно определить с помощью металлургической экспертизы качества используемых материалов.

Наследственные дефекты проявляются в виде образования различных зон с переменной структурой металлической матрицы и высокой анизотропностью включений графита, что практически невозможно устранить изменением литейной технологии производства. При этом разница структур обусловлена последовательной кристаллизацией устойчивых дендритных группировок железа, вслед за которыми располагаются крупные (до 360 мкм) включения пластинчатого, реже завихреного (при модифицировании щелочными и редкоземельными элементами) графита, даже при заливке чугунов в сухие песчаные формы, что впоследствии при динамических нагрузках приводит к хрупкому разрушению матрицы (рис. 1).

Установлено, что основными поставщиками наследственных свойств являются чушковые доменные чугуны и стальной углеродистый лом. Влияние стального лома сказывается в повышении прочностных характеристик при одновременном увеличении склонности чугунов к отбеливанию структуры и росту эвтектического зерна. Таким образом, стальной лом выступает в качестве "разубоживающего наполнителя"

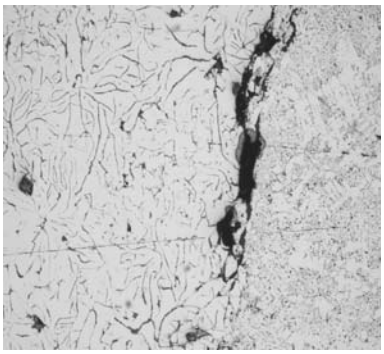


Рис. 1. Холодная трещина в зоне неоднородности структуры. ×100

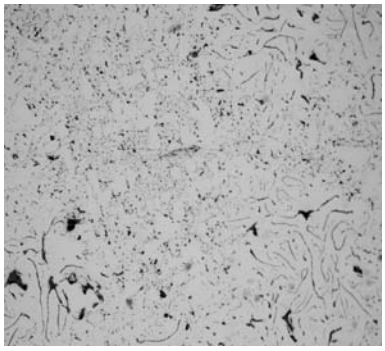


Рис. 2. Распределение неравномерного графита при переплаве чугуна Л5. ×100

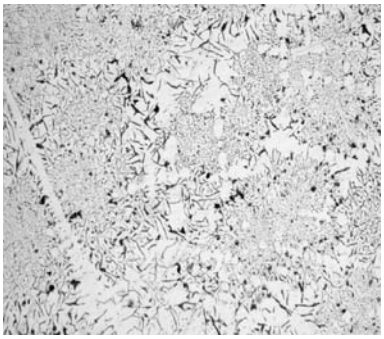


Рис. 3. Распределение колонии крупных дендритов при переплаве чугуна марок ПЛ1 и П1. ×100, травление

металлической матрицы чугунов, а такие дефекты, как чанковый графит, спелеобразный графит и сквозная дендритизация матрицы наследуются от доменных чушковых чугунов.

Влияние ферросплавов и чистых материалов (медь, никель) носит экстенсивный характер и обусловливается количеством вводимого материала, температурой расплава и временем выдержки (от ввода до заливки литейных форм), которое в производственных условиях, как правило, нивелируется серийной технологией.

В результате экспериментальных работ с различными скоростями охлаждения чугунов можно выделить определенные типы наследственных дефектов структуры:

1) дефекты, образующиеся при повышенных скоростях охлаждения (~30 К/с): неравномерная (точечная, пластинчатая, игольчатая и завихренная) форма графита при переплаве серых доменных чугунов Л5 (рис. 2) и полный отбел структуры при использовании белых чугунов;

2) дефекты, образующиеся при низкой скорости охлаждения (~10 К/с): колонии крестообразных и елочных дендритов при использовании белых доменных чугунов ПЛ1, П1 (рис. 3), спелеобразный и завихренный графит с газовой микропористостью при переплаве серых чугунов.

Таким образом, структурная наследственность различных литейных чугунов в зависимости от скорости охлаждения будет проявляться по-разному: низкие скорости способствуют появлению развитых дефектов в виде спелеобразного или завихренного графита с ликвацией растворенного газа преимущественно по границам включений, т.е. приводят к проявлению дефектов включений графита, а более высокие скорости провоцируют возникновение колоний мелких (не более 50 мкм) дефектов в виде разноосных дендритов, точечного графита или приводят к спонтанному отбеливанию всей структуры, несмотря на соблюдения режимов модифицирования. Есть основания полагать, что структурная наследственность в чугунах связана с активностью и формой присутствия в расплаве растворенного углерода.

Выводы

Ледебуритные доменные чугуны при переплаве и последующем легировании марганцем и кремнием сохраняют повышенную склонность к кристаллизации по метастабильной системе, причем при скоростях охлаждения от 10 до 30 К/с, вслед за зоной с полным отбелом структуры следует участок со сквозной дендритизацией матрицы.

При идентичных скоростях охлаждения использование литейных чугунов перлитно-ферритного класса приводит, как правило, к повышенной склонности к образованию спелеобразного и игольчатого графита, что объяснить с позиции классической теории структурообразования не представляется возможным.

На основании разработанной методики металлургической экспертизы установлены наследственные дефекты структуры литых деталей, которые сохраняются при переплаве, легировании и модифицировании чугунов.

Таким образом, для получения бездефектной структуры отливок при использовании в шихте различных доменных чугунов необходимо выполнять следующие условия:

1) для ответственных деталей со сложными переходными сечениями использовать только серые доменные чугуны с перлитной матрицей и пластинчатым графитом до 180 мкм;

2) при выплавке использовать технологию термовременной обработки расплава с температурой выдержки не менее 1723 К, температура заливки не должна превышать 1673 К;

3) скорость охлаждения зон отливок, выходящих за пределы технологического напуска, не должна превышать 30 К/с;

4) строго соблюдать режимы модифицирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крестьянов С.В.** Структурная наследственность при получении отливок из ЧШГ // Литейное производство. 1999. № 1. С. 18–20.

2. **Давыдов С.В.** Технология наномодифицирования доменных и вагранoчных чугунов // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 2. С. 3–9.

3. **Давыдов С.В.** Эффективный способ устранения "наследственности" в доменных чугунах и чугунах вагранoчной плавки // Черные металлы. 2003. № 6. С. 15–17.

4. **Еланский Г.Н., Еланский Д.Г.** Строение и свойства металлических расплавов: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МГВМИ, 2006. С. 228.

Сергей Андреевич Дубровский, д-р техн. наук;
Алексей Александрович Шипельников, инженер;
Александр Николаевич Роготовский, канд. техн. наук

А.В. Юдин *(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)*

Расчет контура стабилизации скорости кристаллизации в системе автоматического управления установки направленной кристаллизации монокристаллических отливок

Рассмотрено влияние разогрева охладителя при проведении процесса направленной кристаллизации на скорость кристаллизации. Предложены пути стабилизации скорости кристаллизации коррекцией скорости опускания формы и поддержанием постоянства аксиального температурного градиента.

The influence of cooler warming up at carrying out of the directed crystallization for crystallization rate is considered. Ways of stabilization of crystallization rate due to correction of form lowering rate and by stabilization of axial temperature gradient are offered.

Ключевые слова: направленная кристаллизация; температурный градиент; стабилизация.

Key words: directed crystallization; temperature gradient; stabilization.

Монокристаллические отливки из никелевых жаропрочных сплавов, как правило, получают методом направленной кристаллизации (способ Бриджмена–Стокбаргера). Тигель или литейная форма с предварительно залитым расплавом постепенно перемещаются в температурном поле нагревателя из горячей зоны в зону охлаждения. Граница, на которой происходит фазовый переход расплав–кристалл, называется фронтом роста или фронтом кристаллизации. Под фронтом роста в данном случае подразумевается пространственное положение изотермы ликвидус сплава, находящегося в литейной форме или тигле.

Основными параметрами, характеризующими процесс направленной кристаллизации, являются осевой (аксиальный) температурный градиент на фронте кристаллизации G_Z (°С/мм) и скорость перемещения фронта роста v_K (мм/мин).

Известно [1], что оптимальные условия для получения монокристальной отливки создаются в том случае, когда в установке обеспечиваются:

– плоский фронт роста в макроскопическом масштабе;

– сохранение положения фронта относительно нагревателя неизменным за все время кристаллизации монокристальной отливки.

Высокие значения аксиального градиента достигаются при погружении отливки в жидкий охладитель, как правило алюминий.

В качестве примера рассмотрим процесс кристаллизации на установке УВНК-9РБ (рис. 1). Печь подогрева формы (ППФ) состоит из двух отдельно управляемых нагревателей – верхнего ППФ (В) в виде прямоугольных графитовых стержней и нижнего ППФ (Н), расположенного над алюминиевой ванной. После разогрева формы до требуемой температуры (как правило, до температуры, превышающей на 100...150 °С ликвидус сплава) и слива металла формы опускают с определенной скоростью в расплавленный алюминий.

Однако поскольку процесс кристаллизации имеет относительно большую продолжительность, то температура охладителя заметно увеличивается, что приводит к снижению аксиального градиента.

На рис. 1 штриховой линией выделена область проведения кристаллизации. Как видно из графиков температуры T_{PPF}^{Up} и T_{PPF}^{Dn} достаточно стабильны, в то время как температуры T_{Al}^{Up} и T_{Al}^{Dn} возрастают.

Таким образом, в установке имеется четыре зоны контроля температуры (рис. 2):

1) в зоне верхнего нагревателя T_{PPF}^{Up};

2) в зоне нижнего нагревателя T_{PPF}^{Dn};

3) в верхней части охладителя T_{Al}^{Up};

4) в нижней части охладителя T_{Al}^{Dn}.

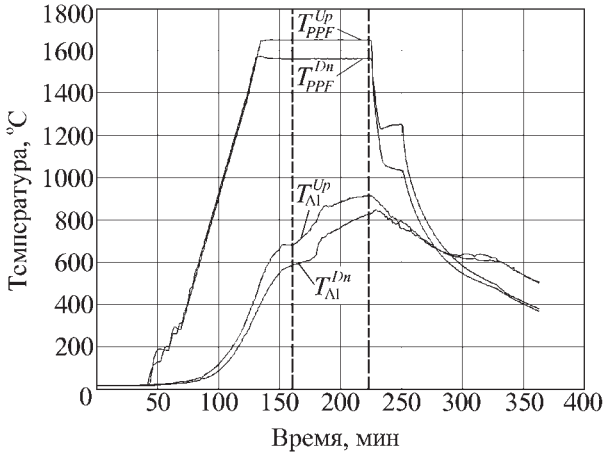


Рис. 1. Общая характеристика процесса:
T_{PPF}^{Up}, T_{PPF}^{Dn} – температура верхнего и нижнего нагревателя печи подогрева формы соответственно; T_{Al}^{Up}, T_{Al}^{Dn} – температура верхней и нижней части охладителя соответственно

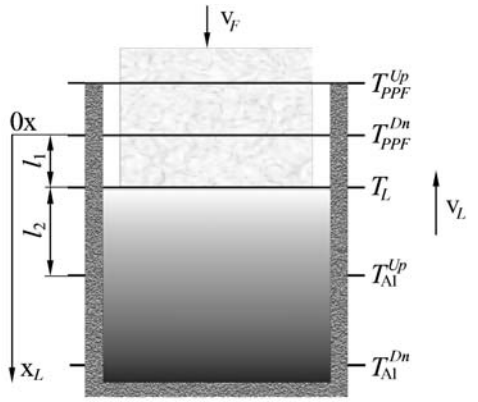


Рис. 2. К определению изотермы ликвидуса:
T_L – температура ликвидуса сплава; v_L – скорость дрейфа фронта кристаллизации; v_F – скорость перемещения формы

Данное распределение обеспечивает фиксированное положение изотермы ликвидуса. Тогда при равномерном движении формы будет обеспечена одинаковая скорость кристаллизации. Однако, как видно из рис. 1, температура охладителя возрастает в процессе кристаллизации. Оценим влияние разогрева охладителя.

Примем, что высота формы соответствует глубине охладителя, а нижняя точка контроля температуры находится на отметке 0 мм.

Для расчета положения изотермы воспользуемся выражением для величины теплового потока [2] на участке l_1:

$$Q = \frac{\lambda S(T_{PPF}^{Dn} - T_L)}{l_1},$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); S – площадь поверхности, перпендикулярной к направлению распространения тепла, м^2.

Поскольку рассматриваемая термическая система не имеет ветвлений, то на участке l_2 будет наблюдаться тот же тепловой поток

$$Q = \frac{\lambda S(T_L - T_{Al}^{Up})}{l_2}.$$

Из равенства тепловых потоков можно получить выражение, не зависящее от теплофизических параметров объекта:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_{PPF}^{Dn} - T_L}{T_L - T_{Al}^{Up}}.$$

Расстояние между T_{PPF}^{Dn} и T_{Al}^{Up} определяется конструкцией установки и известно до начала процесса, обозначим его L. Тогда с учетом $l_1 + l_2 = L$ получим

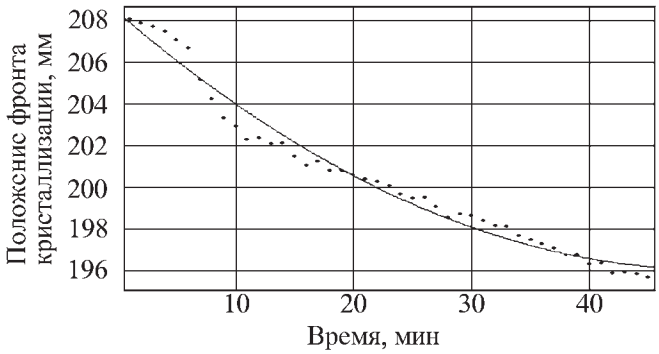


Рис. 3. Положение фронта кристаллизации

выражение для координаты положения фронта кристаллизации:

$$l_1 = \frac{L}{1 + \dfrac{T_{PPF}^{Dn} - T_L}{T_L - T_{Al}^{Up}}}. \quad (1)$$

Примем L = 245 мм (максимальное погружение формы), T_L = 1450 °С. Верхняя зона находится всегда выше температуры ликвидуса, поэтому ее можно не рассматривать. Температура нижней части охладителя также всегда ниже температуры ликвидуса.

На рис. 3 показано изменение положения фронта кристаллизации в результате разогрева охладителя (на рис. 3 точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимированная зависимость).

Скорость дрейфа фронта кристаллизации v_L можно оценить с помощью коэффициентов линейной регрессии. Для данных, приведенных на рис. 3, скорость дрейфа меняется в зависимости от времени t по формуле:

$$v_L = -0{,}00963t + 0{,}4879.$$

Из анализа этой формулы следует, что v_L максимальна в начале процесса и уменьшается по линейному закону.

Как видно из рис. 2 движение формы вниз соответствует перемещению фронта кристаллизации вверх, т.е. скорость перемещения фронта роста определяется как:

$$v_K = v_F + v_L,$$

она всегда выше требуемой, что негативно сказывается на качестве отливки.

Для устранения подобного нежелательного эффекта возможно несколько путей решения:

– дополнить охладитель контуром охлаждения и стабилизировать его температуру;

– проводить коррекцию скорости опускания формы для сохранения неизменной скорости кристаллизации;

– ввести контур стабилизации аксиального температурного градиента, т.е. подогревать верхнюю часть формы по мере разогрева холодильника.

Рассмотрим особенности данных подходов.

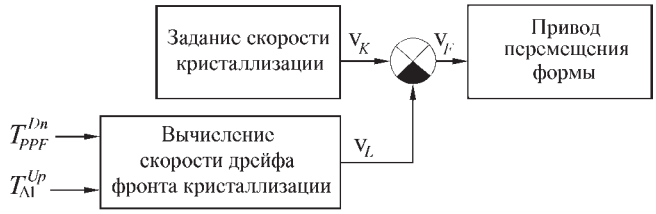


Рис. 4. Структура корректирующего звена по скорости

Первый подход технически трудно реализуем, так как требует серьезных конструктивных изменений охладителя.

Второй подход является более удобным с точки зрения технической реализации, поскольку в большинстве промышленных установок уже имеется управляемый привод перемещения, потребуется лишь введение дополнительного контура управления в составе существующей системы автоматического управления. Тогда для поддержания постоянной скорости кристаллизации необходимо реализовать следующую функцию коррекции:

$$v_F = v_K - v_L.$$

На рис. 4 показана структура корректирующего звена, реализующего указанную функцию.

Блок вычисления скорости дрейфа фронта кристаллизации рассчитывает скорости дрейфа как коэффициенты линейной регрессии по совокупности данных, полученных по формуле (1). Результат вычитания полученной величины из заданной оператором скорости кристаллизации передается в качестве управляющего сигнала приводу перемещения формы.

Третий подход также не требует конструктивных изменений, так как в составе системы уже имеется регулятор температуры и нагреватель, но его реализация требует коррекции опосредованного влияния.

Установка является двухзонным термическим объектом. В данной системе изменение температуры T_{Al}^{Up} в процессе заливки благодаря наличию тепловой проводимости приводит к значительным возмущениям на регулятор температуры T_{PPF}^{Dn}. Поскольку регулятор T_{PPF}^{Dn} настроен на параметры сепаратного канала управления P_{PPF}^{Dn} (до начала заливки), то обеспечить оптимальное управление по возмущению от других каналов очень сложно.

Более эффективным является введение корректирующего звена, учитывающего параметры канала возмущения (рис. 5).

Требование к корректирующему звену можно сформулировать следующим образом: возмущение, приходящее со стороны зоны T_{Al}^{Up} через передаточную функцию W_{12}, должно быть приведено к входу W_1 скорректированным таким образом, чтобы получить

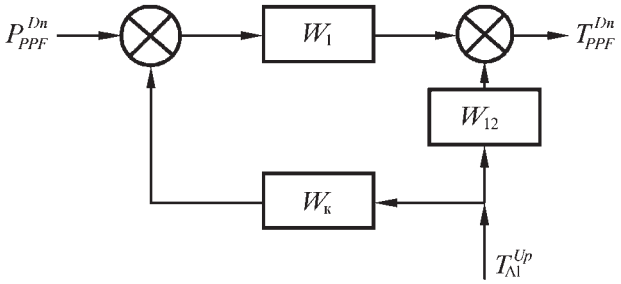


Рис. 5. Структура регулятора температуры с коррекцией: $W_к$ – функция коррекции; W_{12} – передаточная функция от температуры T_{Al}^{Up} к T_{PPF}^{Dn}; W_1 – передаточная функция регулятора температуры T_{PPF}^{Dn}

на выходе переходный процесс, совпадающий с процессом на выходе W_{12}, но противоположный по знаку:

$$W_1 W_к = -W_{12}.$$

Примем, что передаточные функции соответствуют инерционному звену:

$$W_1 = \frac{K_1}{\tau_1 P + 1},\ W_{12} = \frac{K_{12}}{\tau_{12} P + 1},$$

где K_1, K_{12} – коэффициенты передачи звеньев; τ_1, τ_{12} – постоянные времени для этих звеньев; P – оператор Лапласа.

Тогда выражение для функции коррекции примет вид:

$$W_к = -\frac{K_{12}(\tau_1 P + 1)}{K_1(\tau_{12} P + 1)} = -K_к \frac{(\tau_1 P + 1)}{(\tau_{12} P + 1)}.$$

Введение коррекции позволяет значительно снизить влияние возмущений T_{Al}^{Up} на регулятор подогрева форм, причем качество компенсации определяется только точностью определения передаточных функций объекта и регулятора температуры.

Введение контуров стабилизации скорости кристаллизации коррекцией скорости опускания формы и поддержанием постоянства аксиального температурного градиента позволяет повысить качество монокристаллических отливок.

Автор статьи выражает благодарность проф., д-ру техн. наук С.П. Серебрякову (кафедра материаловедения и литейного производства Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева), под руководством которого выполнена эта работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Монокристаллы** никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.

2. **Тепломассообмен** в литейном производстве: сб. задач и упражнений по курсу / сост. А.А. Шатульский. Ярославль: РАТИ, 1991. 44 с.

Алексей Викторович Юдин, канд. техн. наук

УДК 669.018.2:669.715

В.И. Рязанцев *(НИАТ, Москва)*, **В.В. Овчинников**
(Московский государственный индустриальный университет)

Циклическая прочность сварных соединений из алюминиевых сплавов

Приведены экспериментальные данные по прочности новых свариваемых алюминиевых сплавов и их сварных соединений при одноосном и двухосном циклическом нагружении. Показано влияние термической обработки сварных соединений на их циклическую прочность.

Experimental data on the strength of the new aluminum alloys to be welded and their welded connections with the uniaxial and biaxial cyclic load are given. The influence of the heat working of welded joints on their cyclic strength is shown.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; сварные соединения; одноосное циклическое нагружение; двухосное циклическое нагружение; термическая обработка сварных соединений.

Key words: aluminum alloys; welded joints; uniaxial cyclic load; biaxial cyclic load; the heat working of welded joints.

Начиная с 1940-х гг. большинство элементов планера самолетов изготовляли из алюминиевых сплавов Д16Т и В95Т1 (в России), 2024 и 7075 (в США и других странах). В начале 1970-х гг. в связи с изменением подхода конструкторов к выбору материалов самолетов и введением новых характеристик механических свойств, названных ресурсными, были разработаны модификации этих сплавов 1161, 1163 и 1973 (в России), 2324, 2524, 7055, 7150 (в США и других странах) [1]. Все полуфабрикаты из этих сплавов обладают прекрасным комплексом механических и ресурсных свойств, но являются несвариваемыми.

В связи с этим все пассажирские самолеты представляют собой клепаные конструкции из вышеперечисленных алюминиевых сплавов. Число заклепок в легких самолетах достигает сотен тысяч, а в больших пассажирских самолетах-аэробусах – 3...5 миллионов.

Клепке предшествует сверление миллионов отверстий, которые ослабляют рабочее сечение элементов конструкции, являются концентраторами напряжений, снижают коррозионную стойкость. Кроме того, клепка конструктивно невозможна без нахлесток, что увеличивает массу конструкции, снижает коррозионную стойкость, а также способствует увеличению объема лакокрасочных покрытий.

Несмотря на определенные успехи в автоматизации процессов клепки (автоматами типа "Джемкор"), значительный объем клепаных соединений выполняют вручную (до 30...60 %). Переход к сварке позволил бы не только устранить эти недостатки, но и обеспечить ряд преимуществ.

Конструкторы и технологи стремились на протяжении длительного времени создать сварные самолеты. Одним из основных препятствий при этом было отсутствие хорошо свариваемых алюминиевых сплавов, обладающих высокой прочностью в условиях вибрационных нагрузок и коррозионной стойкостью.

В последнее время благодаря фундаментальным работам ВИАМ и ВИЛС разработаны новые свариваемые алюминиевые сплавы: 1420, 1421, 1423, 1460, 1570 и др. Поэтому значительный интерес представляют данные по их свойствам в сварных конструкциях в сравнении с широко известными свариваемыми сплавами АМг6, ВАД1 и 1201.

Результаты испытаний клепаных зон натурных самолетных конструкций на повторные нагрузки хорошо согласуются с результатами испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) по пульсирующему циклу образцов со свободным отверстием при коэффициенте концентрации $K = 2{,}6$ из таких же материалов при частотах 3...5 Гц [2]. Поэтому на практике давно принято определять и прогнозировать долговечность реальных клепаных конструкций по результатам испытаний таких образцов.

Можно предположить, что для реальных сварных конструкций также можно прогнозировать долговечность по результатам испытаний аналогичных сварных образцов.

В данной работе исследовали циклическую прочность сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов АМг6, ВАД1, 1201, 1420, 1421, 1460 и 1570 в сравнении с основным металлом. Цель работы – определение рациональных областей применения сварных конструкций взамен клепаных.

Исследования проводили на модельных образцах из листа толщиной 2 и 3 мм со стыковыми сварными швами с удалением усиления и проплава или без их удаления. Во всех случаях применяли однопроходную автоматическую сварку с присадочной проволокой. Источник питания ИСВУ-315. Сварка на переменном синусоидальном токе в среде аргона.

Статические испытания образцов показали, что прочность основного металла (в состоянии "закалка + искусственное старение") для сплавов 1201, ВАД1, 1420, 1421, 1423 составляет 390...500 МПа, а сплава 1460 – 520...580 МПа. Статическая прочность основного металла в состоянии "закалка" для вышеперечисленных термообрабатываемых сплавов находится в интервале 315...375 МПа. Для нетермообрабатываемых сплавов АМг6М, 1570 статическая прочность основного металла находится в пределах 320...420 МПа.

Для сварных стыковых соединений из указанных сплавов (с усилением и проплавом) без термической обработки

Типичные механические свойства алюминиевых сплавов и их сварных соединений

Марка сплава	Свойства основного материала				Свойства сварных соединений			
	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Угол загиба, °	Предел прочности, МПа	Угол загиба, °	Ударная вязкость *KC*U, Дж/см^2	
							по шву	по зоне сплавления
АМг6М	330	170	21	120	315	100	26,0	17,0
АМг6Н	370	185	15	70	320	95	25,0	18,0
1570	410	310	16	70	395	100	30	21,0
ВАД1	425	330	14	65	335	40	14,0	7,5
1420	445	235	11	78	375	85	18,0	8,0
1421	470	335	9	80	385	76	18,5	11,0
1423	420	270	10	65	365	78	17,1	8,5
1460	560	510	7	30	290	25	12,0	7,5
1201Т1	440	340	12	70	280	60	18,5	9,2

после сварки статическая прочность составляет 270...400 МПа. Наиболее высокую статическую прочность 390...400 МПа сварных соединений получили на образцах из сплава 1570, а наиболее низкую 270...315 МПа – на образцах из сплавов 1201, 1460, ВАД1, АМг6М, АМг6Н. Для сплавов 1420, 1421, 1423 статическая прочность сварных соединений на уровне 350...380 МПа (таблица).

Повторно-статические испытания (одноосное напряженное состояние) образцов (без концентраторов) из основного металла термообрабатываемых сплавов 1201, ВАД1, 1460, 1420, 1421, 1423 (в состоянии "закалка + искусственное старение") показали, что на базе $2\cdot10^4$ циклов предел прочности практически одинаков и составляет 310...365 МПа (рис. 1, 2).

Нанесение на образцы из основного металла (состояние "закалка + искусственное старение") концентратора в виде отверстий диаметром 1,0; 1,5 и 2,0 мм приводит к резкому падению показателей повторно-статической прочности до 220...280 МПа (т.е. на 90...100 МПа меньше, чем без отверстия).

При повторно-статических испытаниях (одноосное напряженное состояние) образцов из основного металла вышеуказанных сплавов в состоянии "закалка" предел выносливости равен 260...290 МПа. Наличие в рабочей части образцов из этих сплавов отверстий диаметром 1,0; 1,5 и 2,0 мм приводит к резкому снижению предела выносливости до 195...240 МПа (т.е. на 50...60 МПа меньше, чем без отверстия).

Повторно-статические испытания образцов из основного металла нетермообрабатываемых сплавов АМг6Н,

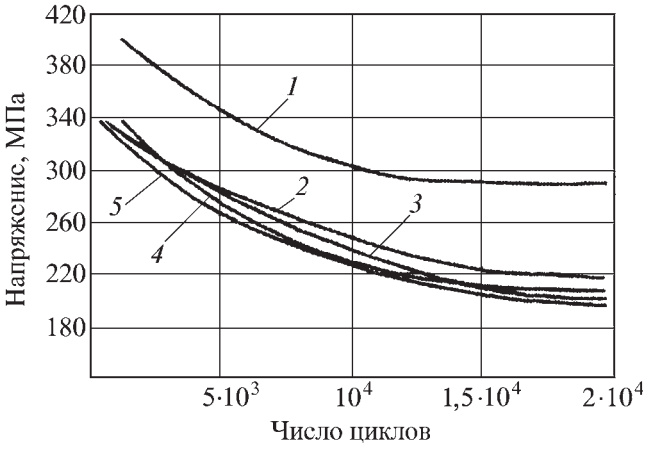


Рис. 1. Кривые малоцикловой усталости при одноосном напряженном состоянии сплава 1201 в зависимости от типа концентратора и термообработки:
1 – основной металл; *2* – сварное соединение; *3* – сварное соединение после искусственного старения; *4* – основной металл с отверстием; *5* – основной металл с отверстием после искусственного старения

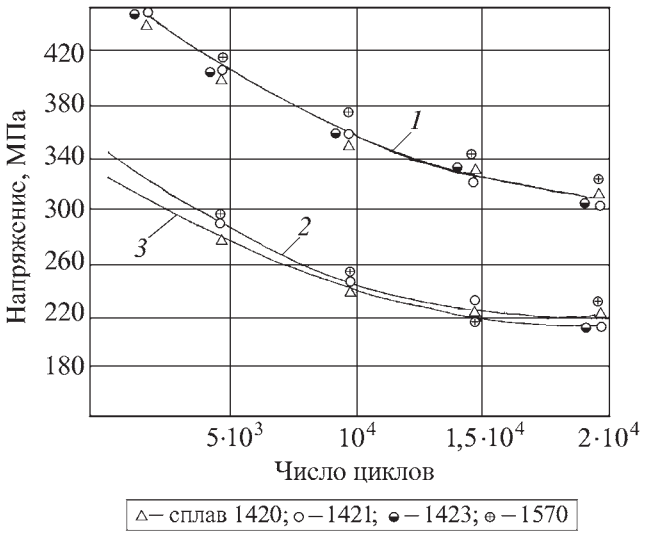


Рис. 2. Кривые малоцикловой усталости при одноосном напряженном состоянии сплавов 1420, 1421, 1423 и 1570 в зависимости от типа концентратора:
1 – основной металл; *2* – основной металл с отверстием; *3* – сварное соединение

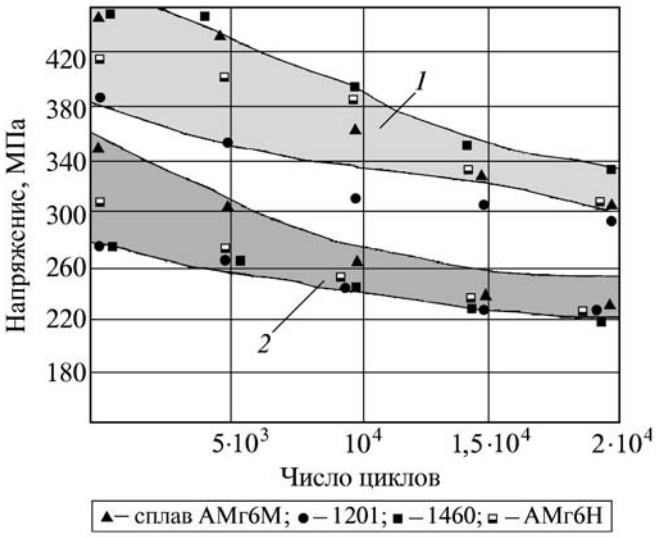


Рис. 3. Кривые малоцикловой усталости при одноосном напряженном состоянии сплавов 1460, 1201, АМг6М и АМг6Н: *1* – основной металл; *2* – основной металл с отверстием

АМг6М, 1570 показали, что на базе $2 \cdot 10^4$ циклов предел выносливости равен 215...285 МПа (рис. 3).

Повторно-статические испытания сварных стыковых образцов (с усилением и проплавом) из вышеприведенных сплавов показали, что предел выносливости на базе $2 \cdot 10^4$ циклов находится в диапазоне 180... 280 МПа.

Сварные соединения сплава 1201 (лист толщиной 3 мм) с усилением и проплавом (присадочная проволока Св1201) имеют предел выносливости на базе $2 \cdot 10^4$ циклов (220±10) МПа, а на образцах основного металла из этого же сплава с отверстием в рабочей части (215±10) МПа.

Для сплава 1420 (лист толщиной 3 мм) предел выносливости сварных стыковых соединений (присадочная проволока СвАМг63) равен (220±10) МПа, а на образцах основного металла из этого же сплава с отверстием в рабочей части (225±10) МПа.

Для сплава 1570 (лист толщиной 2 мм) предел выносливости основного металла с отверстием (220±10) МПа, а на сварных образцах (215±10) МПа (с присадочной проволокой СвАМг63) и (200±10) МПа (с присадочной проволокой Св1571).

Для сплава АМг6М (лист толщиной 2 мм) предел выносливости основного металла с отверстием составляет (210± ±10) МПа, а сварного стыкового соединения (200±10) МПа.

Аналогичное практическое равенство показателей предела выносливости при повторно-статических испытаниях для образцов основного металла с отверстием в рабочей части и сварных стыковых соединений было также получено для сплавов 1421, 1423 и 1460.

Нанесение на поверхность образцов из основного металла с отверстием в рабочей зоне и сварных соединений клеевых композиций марок ВК-1МС или ВК-39 не привело к заметному изменению показателей повторно-статических испытаний для всех исследованных сплавов.

Также было отмечено, что большое влияние на результаты повторно-статических испытаний оказывает наличие или отсутствие усиления и проплава в сварных соединениях. Для сварных соединений сплава 1570 предел выносливости на базе $2 \cdot 10^4$ циклов с усилением и проплавом составляет 210 МПа, а без проплава – 240 МПа. Для сварных соединений из сплава 1201 предел выносливости равен 220 МПа (образцы с усилением и проплавом) и 250 МПа (образцы без проплава). Аналогичные зависимости отмечаются и для всех других исследованных сплавов.

Наличие подварок, выполняемых ручной сваркой, приводит к заметному изменению показателей малоцикловой усталости. Причем степень изменения показателей определяется только маркой сплава. Например, для сплава 1570 наличие 1, 2 и 3 подварок приводит к снижению предела прочности на базе $2 \cdot 10^4$ циклов на 5...7; 10...12 и 12...18 % соответственно от исходных значений на образцах без подварок. На образцах из сплавов 1420, 1201, 1460 наличие 2 и 3 подварок приводит к существенному снижению показателей малоцикловой усталости, а именно на 25...35 и 30...45 % соответственно от исходных показателей без подварок. Поэтому для ответственных сварных самолетных конструкций отсутствие подварок и обязательное снятие проплава надо обеспечивать за счет технологии, оснастки и оборудования. Такая технология была разработана и внедрена при изготовлении кабины экипажа орбитального самолета "Буран" [3].

Из анализа вышеприведенных данных по малоцикловой усталости следует, что на базе $2 \cdot 10^4$ циклов показатели усталости для образцов основного металла с отверстием и сварных стыковых образцов с усилением и проплавом практически совпадают, причем это совпадение характерно для всех исследованных сплавов без исключения.

Для образцов из основного металла в состоянии "закалка + искусственное старение" и "закалка" показатели малоцикловой усталости сильно различаются: 320...360 и 255...290 МПа соответственно.

Для сварных стыковых соединений в состоянии "закалка + искусственное старение + сварка" и "закалка + + сварка + искусственное старение" показатели малоцикловой усталости практически совпадают (для сплавов 1420, 1201, 1460) и заметно различаются (для сплавов 1421, 1423). Следовательно, для высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов можно с определенной степенью достоверности аппроксимировать результаты малоцикловых испытаний образцов из основного металла с отверстием ($K = 2{,}6$) на показатели сварных соединений этих же сплавов с усилением и проплавом.

Совершенно иная картина наблюдается при малоцикловых испытаниях на двухосное напряженное состояние (рис. 4). Кривые малоцикловой усталости в этом случае для образцов из основного металла и основного металла с отверстием в рабочей зоне практически совпадают, а для сварных стыковых соединений располагаются значительно ниже.

Например, для образцов основного металла при двухосном растяжении на базе $2 \cdot 10^4$ циклов разрушающая нагрузка для всех исследованных сплавов примерно равна 290...325 МПа (в состоянии "закалка") и 310...340 МПа (в состоянии "закалка + искусственное старение").

На образцах основного металла с центральным отверстием при двухосном растяжении разрушающая нагрузка

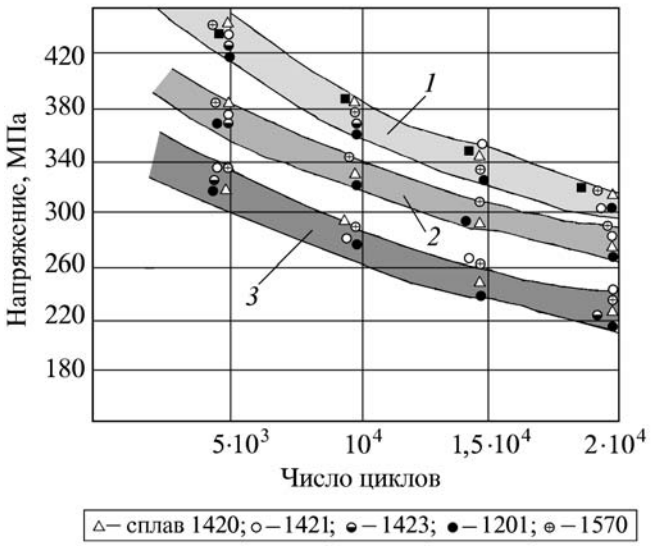


Рис. 4. Кривые малоцикловой усталости при двухосном напряженном состоянии сплавов 1570, 1420, 1421, 1201 и 1423: *1* – основной металл; *2* – основной металл с отверстием; *3* – сварное соединение

равна 280...300 МПа (в состоянии "закалка") и 295...335 МПа (в состоянии "закалка + искусственное старение").

На сварных стыковых образцах при двухосном растяжении разрушающая нагрузка равна 235...280 МПа (перед сваркой закалка + искусственное старение), 210...250 МПа (перед сваркой закалка) и 250... 290 МПа (после сварки искусственное старение).

Нанесение клеевых покрытий на поверхность образцов основного металла, основного металла с отверстием и сварных стыковых соединений перед малоцикловыми испытаниями на двухосное растяжение не дало принципиального повышения разрушающей нагрузки.

Анализируя вышеприведенные результаты малоцикловых испытаний, установили, что при одноосном напряжении на базе $2{\cdot}10^4$ циклов показатели разрушения сварных стыковых соединений практически такие же, как и для основного металла с центральным отверстием в рабочей зоне.

С другой стороны, при двухосном напряжении на базе $2{\cdot}10^4$ циклов показатели разрушения сварных стыковых соединений значительно меньше, чем для образцов из основного металла с центральным отверстием.

Вид термообработки сварных соединений перед испытаниями оказывает определенное влияние на показатели малоцикловой прочности. Наиболее высокие показатели имели сварные образцы из сплавов 1421, 1423, прошедшие искусственное старение после сварки.

Возможно в результате подбора оптимальных режимов термообработки до и после сварки (двухступенчатое старение) удастся еще более повысить малоцикловую прочность сварных соединений из определенной группы алюминиевых сплавов (например, системы Al–Mg–Li–Sc). Подробное рассмотрение этого положения применительно к сплаву 1421 приведено в работе [4].

Результаты усталостных испытаний (рис. 5, 6) образцов из основного металла сплавов ВАД1, 1201, 1420, 1421, 1423, 1460, АМг6Н, АМг6М и 1570 показали, что предел усталости на базе $2{\cdot}10^4$ циклов составляет 120...160 МПа, причем более высокие показатели в этом диапазоне имеют образцы из сплавов АМг6М и 1570, а наиболее низкие – образцы из сплавов ВАД1, 1201, 1420 и 1460. Усталостные испытания сварных образцов из этих же сплавов показали, что предел усталости находится в диапазоне 40...80 МПа, причем более высокие показатели имели сварные образцы из сплава 1570.

Усталостные испытания образцов из основного металла с отверстием в рабочей зоне показали, что предел усталости на базе $2{\cdot}10^4$ циклов практически равен пределу усталости сварных образцов из этих же сплавов (отклонение в интервале 5...15 %).

Нанесение на поверхность сварных образцов клеевых покрытий в рабочей зоне позволяет значительно повысить предел усталости соединений. Например, для сварных образцов из сплавов 1420, 1421, 1423 нанесение клеев ВК-1МС и ВК-39 повышает предел усталости на базе $2{\cdot}10^7$ циклов в 1,6–1,85 раза. На образцах из сплава АМг6М увеличение числа циклов разрушения при нанесении клея меньше в 1,3–1,5 раза. Природа явлений при нанесении клеев на поверхность образцов подробно рассмотрена в работе [5].

По данным [1, 2, 4] все самолетные и ракетные конструкции с учетом условий их эксплуатации можно разделить на 5 групп, где определяющими являются следующие показатели:

1. Малоцикловая усталость при двухосном напряженном состоянии;
2. Малоцикловая усталость при одноосном напряженном состоянии;
3. Усталостная прочность;
4. Статическая прочность;
5. Акустические нагрузки.

Из данных рис. 1–4 следует, что в конструкциях 1 группы применение сварных конструкций из современных алюминиевых сплавов является проблематичным, так как показатели их циклической прочности заметно ниже клепаных.

В конструкциях 2 группы показатели циклической прочности сварных и клепаных соединений практически совпадают, и выбор способа соединения определяется требованиями герметичности, массового совершенства, коррозионной стойкости и т.д.

В конструкциях 3 группы показатели циклической прочности сварных и клепаных соединений практически совпадают. Нанесение клеев на поверхность сварных соединений дает им заметные преимущества перед клепаными соединениями.

В конструкциях 4 группы сварные конструкции из алюминиевых сплавов типа 1201, 1460, ВАД1, АМг6Н имеют показатели статической прочности ниже, чем клепаные, а из алюминиевых сплавов типа 1570 выше или на уровне клепаных.

В конструкциях 5 группы сварные конструкции и особенно клеесварные конструкции обладают определенными преимуществами перед клепанными конструкциями [6].

С учетом вышеизложенного наиболее подходящими сварными конструкциями взамен клепанных могут быть все типы воздухозаборников, баковых отсеков и планеры орбитальных самолетов, запускаемых с помощью ракетных систем.

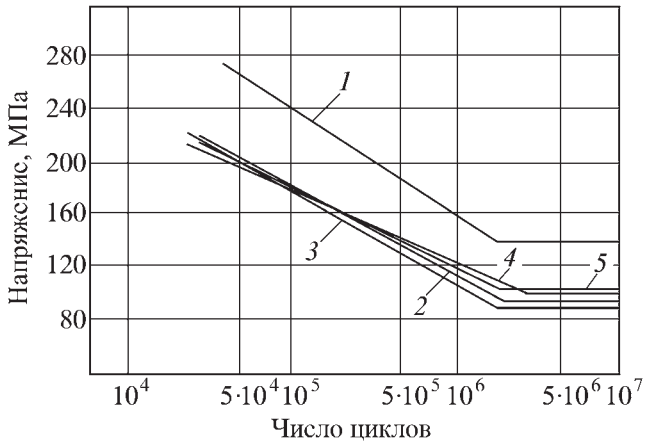


Рис. 5. Кривые усталости сплава 1201 в зависимости от типа концентратора и термообработки:
1 – основной металл; *2* – основной металл с отверстием; *3* – основной металл с отверстием после искусственного старения; *4* – сварное соединение; *5* – сварное соединение после искусственного старения

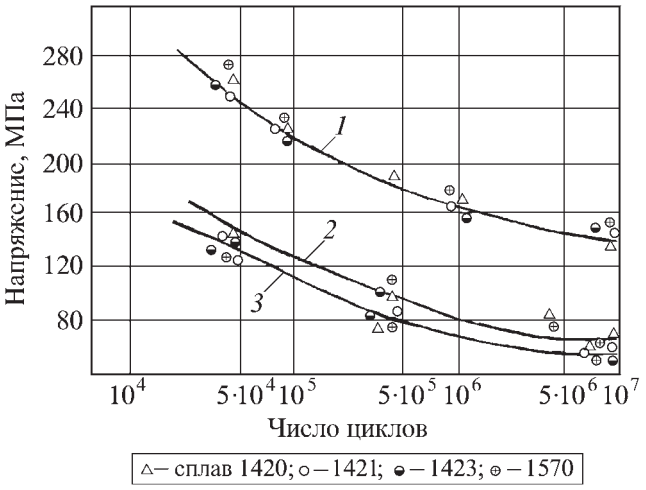


Рис. 6. Кривые усталости сплавов 1420, 1421, 1423 и 1570:
1 – основной металл; *2* – основной металл с отверстием; *3* – сварное соединение

Полученные кривые малоцикловой усталости позволяют решить еще две задачи:

– по заданной долговечности определить допустимый уровень эквивалентных напряжений;

– по полученным эквивалентным напряжениям определить предполагаемую долговечность конструкции.

Если задан ресурс планера самолета или другого узла самолета 25 тыс. полетов, то при коэффициенте безопасности, равном 4, конструкция должна выдерживать $1\cdot10^5$ циклов.

Таким образом, чтобы обеспечить ресурс сварной конструкции в 25 тыс. полетов, за основу необходимо принять уровень напряжений при испытаниях на малоцикловую усталость, при которых образцы имеют среднюю долговечность не менее 100 тыс. циклов.

Из приведенных на рис. 1–4 кривых малоцикловой усталости сварных соединений получили, что уровень напряжений $\sigma_{экв}$ исследованных сплавов составляет $\sigma_{экв}$ ~ ~ 180...220 МПа. Для сравнения основной материал, как правило, имеет $\sigma_{экв}$ ~ 300...340 МПа, а для клепаных соединений $\sigma_{экв}$ ~ 190...230 МПа.

Работу целесообразно продолжить в направлении исследования натурных (или модельных) элементов (отсеков), выполненных современными способами сварки и клепки.

Выводы

1. По результатам циклических испытаний установлено, что при одноосном напряженном состоянии показатели малоцикловой усталости сварных образцов и образцов основного металла с центральным отверстием практически совпадают. При двухосном напряженном состоянии показатели разрушения сварных образцов значительно меньше, чем для образцов из основного металла с центральным отверстием.

2. Показатели усталостных испытаний сварных образцов и образцов из основного металла с центральным отверстием практически равны.

3. Сварные соединения вместо клепки наиболее рационально применять в конструкциях, где основное нагружение малоцикловое одноосное или только усталостное. В конструкциях, где основное нагружение малоцикловое двухосное, замена клепки на сварку в большинстве случаев нецелесообразна (по показателям циклической прочности).

4. Для реализации преимуществ сварных конструкций перед клепаными конструкциями необходимо применять технологии, оснастку и оборудование, обеспечивающее только однопроходную автоматическую сварку без подварок с обязательным снятием корня шва.

5. Термическая обработка после сварки (искусственное старение, в том числе и двухступенчатое) позволяет для ряда сплавов (1421, 1423) заметно повысить показатели статической и циклической прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дмитриев В.Г., Замула Г.Н., Коновалов В.В.** Приоритетные направления совершенствования материалов для конструкций перспективных самолетов // Технология легких сплавов. 2003. № 1. С. 3–8.

2. **Туполев А.А., Сулименков В.В., Зельдин В.К.** Повышение эксплуатационных характеристик материалов и эффективности конструкций пассажирских самолетов // Материаловедение алюминиевых сплавов. М.: Наука, 1985. С. 22–31.

3. **Рязанцев В.И.** Технология производства сварных конструкций орбитального корабля "Буран" // Сварочное производство. 1999. № 10. С. 32–36.

4. **Мацнев В.Н., Рязанцев В.И., Данилов С.Ф.** Исследование технологических возможностей Al–Li-сплава 01421 для штампосварных интегральных конструкций // Авиационная промышленность. 2004. № 3. С. 36–42.

5. **Рязанцев В.И.** Улучшение эксплуатационных свойств сварных соединений путем нанесения полимерных покрытий // Сварочное производство. 1998. № 6. С. 26–30.

6. **Шавырин В.Н., Рязанцев В.И.** Клеесварные конструкции. М.: Машиностроение, 1981. 167 с.

Владимир Иванович Рязанцев, канд. техн. наук;
Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук

В.М. Тяжельников, Б.Г. Каплунов *(ООО "Кузнечно-прессовый завод "РУСИЧ", г. Курган, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)*

Новая технология штамповки полых поковок высоких ступиц

Предложены способ и технология штамповки полых поковок высоких ступиц. Изложен принцип согласования переходов штамповки. Приведены результаты математического и экспериментального анализа формообразования ступицы прошивкой-раздачей. Даны примеры промышленной реализации ресурсосберегающей технологии на молотовом штамповочном агрегате.

The method and manufacturing techniques of stamping hammer hollow forged piece high naves are offered. The principle of the coordination of transitions of punching is stated. Results of the mathematical and experimental shaping analysis of nave that are resulted by an insertion-distribution are stated. Examples of industrial realization of new alternative technology for hammers are given.

Ключевые слова: штамповка; полые поковки; высокие ступицы; молотовые агрегаты; прошивка-раздача.

Key words: stamping; hollow forged piece; high naves; hammers; insertion-distribution.

Детали "ступица", "ступица с фланцем", "цапфа" являются широко распространенными комплектующими машин транспортного и сельскохозяйственного назначения. Значительная часть этих деталей имеет развитую ступичную часть со сквозным отверстием (рис. 1).

Основными заготовками для указанной номенклатуры изделий являются горячештампованные поковки. Распространенная технология получения поковок ступиц с прошиваемым отверстием – штамповка выдавливанием на кривошипных горячештамповочных прессах [1]. Недостаток технологии – многопереходность процесса формообразования, что требует применения специальных блоков штампов и крупных КГШП.

Рис. 1. Детали типа "ступица с фланцем"

Известен способ штамповки полых осесимметричных изделий комбинированным выдавливанием сдвигом (КВС) [2]. Существенный недостаток этого способа – необходимость предварительной подготовки исходной заготовки путем калибровки, фигурной осадки или закрытой штамповки. Получение качественных поковок с полой ступицей возможно только в узком интервале изменения коэффициента прошивки.

Традиционная технология изготовления поковок типа "ступица" на молотовых штамповочных агрегатах предполагает выполнение ступичной части сплошной, с глухой наметкой отверстия [1]. Сквозное отверстие получают последующей обработкой резанием, что определяет высокую трудоемкость изготовления и большие отходы металла.

На снижение указанных показателей направлен способ штамповки с прошивкой глубоких отверстий в высокой ступице [3]. Первоначально на молоте штампуют поковку, окончательно оформленную во всех ее частях, кроме ступичной. На последнюю делается только предварительный набор металла, который затем окончательно деформируют в комбинированном штампе на механическом прессе. Здесь за один ход обрезают облой и прошивают отверстие при одновременном формировании ступицы. Недостатки способа – коробление фланца и нестабильность высоты

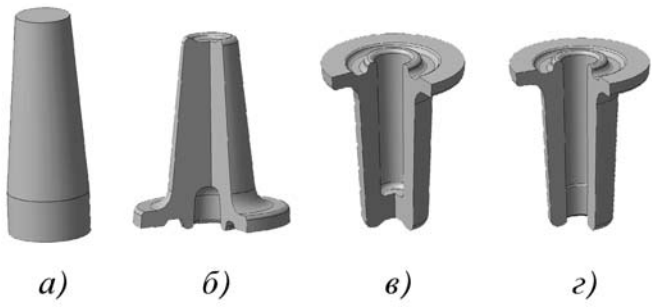


Рис. 2. Переходы штамповки полых поковок высоких ступиц

поковки вследствие возможного возникновения при прошивке обратного выдавливания.

Новый способ молотовой штамповки [4] устраняет указанные недостатки. Предложено получать предварительную поковку со ступичной частью окончательной высоты, а конусностью больше требуемой. Завершающее формообразование полой поковки осуществляется прошивкой-раздачей конического набора. При этом необходимо обеспечить согласование объема прошиваемой полости и объема, образуемого разницей конусности ступичной части окончательной и предварительной поковок. Формирование полой ступицы по схеме прошивка-раздача при равенстве указанных объемов предотвращает обратное выдавливание, что повышает качество полых поковок ступиц: стабилизирует высотный размер и минимизирует коробления фланца. Кроме того, свободное радиальное течение металла ступичной части при прошивке раздачей снижает силу и работу деформации.

Способ осуществляется по следующим технологическим переходам: оттяжка конца заготовки в протяжном ручье (рис. 2, *а*), после чего в открытом ручье на молоте штампуют с облоем предварительную поковку, равную по высоте окончательной, с полностью оформленным фланцем и набором металла на ступичную часть (рис. 2, *б*). Затем на обрезном прессе в специальном штампе, после обрезки облоя, последовательно производятся глубокая прошивка полости и пробивка перемычки (рис. 2, *в, г*).

Для реализации предложенного формоизменения переходы должны быть согласованы (рис. 3) по объему ступичной части предварительной (рис. 3, *а*) и окончательной (рис. 3, *б*) поковки. Условие равенства объемов V_1 и V_3 с учетом объема наметки отверстия (V_2) прошиваемой полости (V_4) и перемычки (V_5): $V_1 - V_2 = V_3 - V_4 + V_5$, выполняется назначением соответствующего угла конусности α_1 набора металла на ступицу. По его расчетному объему определяется меньший диаметр конуса. Объем ступичного набора будет стабильным, поскольку колебания массы исходной заготовки компенсированы облоем.

Первоначально проектируется окончательная поковка с перемычкой под пробивку. При этом полая

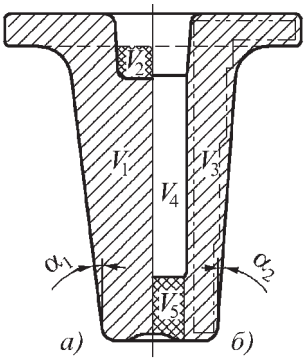


Рис. 3. Схема к согласованию объемов переходов

ступичная часть может иметь минимальный наружный штамповочный уклон α_2 = 2...3°, внутренний – 1,0...1,5°. Толщина перемычки под пробивку определяет уровень нагрузки на прошивной пуансон и назначается не менее половины его диаметра.

При проектировании предварительной поковки следует учитывать возможность практического обеспечения угла α_1. Формообразование ступичной части предварительной поковки требуемых размеров и объема ограничивается как углом конусности ручья для протяжки (оттяжки) конца заготовки 5...7°, так и необходимым для заполнения глубокой конической полости штамповочным уклоном α_1 = 3...7°.

Для удобства конструирования предварительной поковки разработана специальная программа для ЭВМ "Ступица" [5]. По информации о геометрии ступичной части окончательной поковки программа вычисляет ее объем, под который пользователь-технолог подбирает при учете указанных ограничений угол α_1 (рис. 4). Далее выполняется автоматический расчет диаметра меньшего основания конического набора.

Проверка выполнимости предложенных переходов штамповки, прогнозирование качества полых поковок и оценка силового режима прошивки-раздачи проводились путем математического моделирования деформаций в программе РАПИД-2D [6]. Температурно-скоростные и контактные условия расчета формоизменения методом конечных элементов соответствовали режиму горячей штамповки поковки типа "ступица" на штамповочном молоте и кривошипном обрезном прессе. Реологические свойства обрабатываемого материала задавались экспериментальными кривыми скоростного упрочнения конструкционной стали.

Результаты компьютерного моделирования полного формоизменения (рис. 5) показали, что для полноты и бездефектности предварительного набора на ступицу молотовую штамповку необходимо осуществлять из заготовки с оттянутым концом (рис. 5, *а*). На стадии прошивки ступицы, согласованной указанным образом с окончательной поэтапной раздачей, достигается ее полное оформление (рис. 5, *б*). При этом обратного выдавливания не возникает, что стабилизирует высотный размер и устраняет коробление фланца поковки. За счет свободного, преимущественно

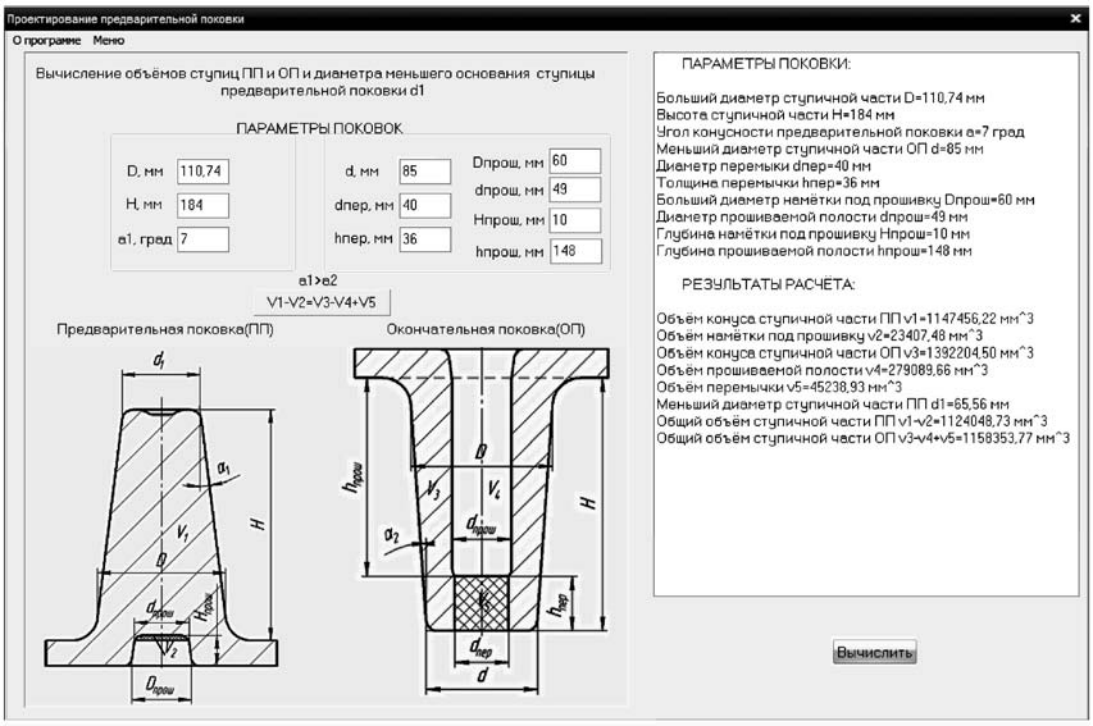


Рис. 4. Рабочее окно программы "Ступица"

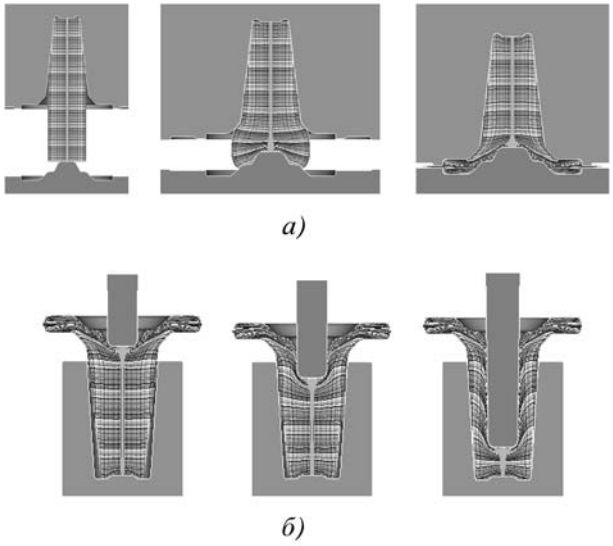


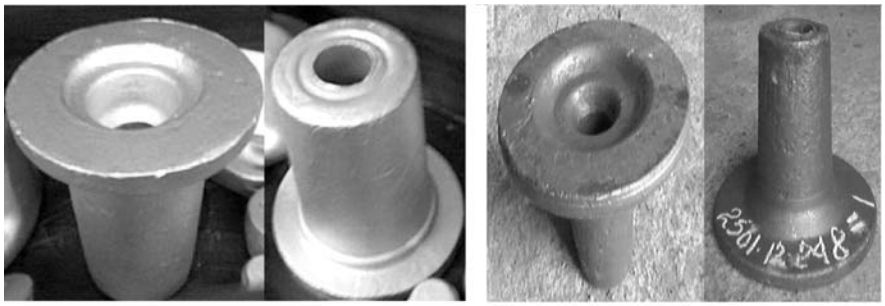
Рис. 5. Результаты математического моделирования основных переходов штамповки

радиального, течения металла при прошивке раздачей снижаются сила и работа деформации.

Экспериментальная проверка предложенного формоизменения в лабораторных условиях на свинцовых образцах (рис. 6) также показала реализуемость прошивки-раздачи с обеспечением требуемой геометрии модели поковки. Одновременно подтверждена достоверность данных математического моделирования предложенного процесса в программе РАПИД.

Рис. 6. Экспериментальное моделирование прошивки-раздачи

На основе способа и результатов научного анализа переходов деформации создана новая технология штамповки, прошедшая опытно-промышленное испытание на поковке "ступица" (рис. 7, *а*) из стали 45, массой 13,2 кг. Сквозное отверстие диаметром 40 мм получено при глубине предварительной прошивки 110 мм. В настоящее время технология применяется на Кузнечном заводе ОАО "Курганский машиностроительный завод" [7] для изготовления серийных партий поковки "фланец" (рис. 7, *б*). Параметры поковки: сталь 38ХС, масса 17,2 кг, диаметр отверстия 44 мм, глубина прошитой полости 150 мм, толщина перемычки под пробивку 30...35 мм.



а) б)

Рис. 7. Полые поковки высоких ступиц

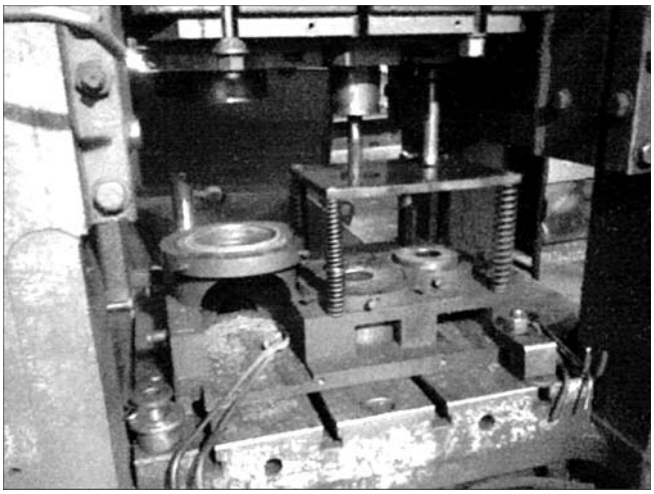


Рис. 8. Штамп комбинированный для обрезки-прошивки-пробивки

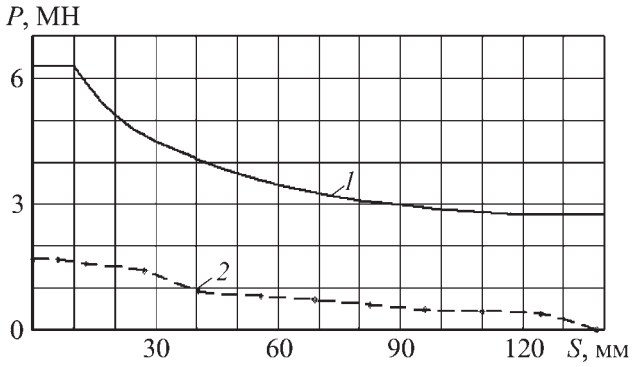


Рис. 9. График допускаемой силы деформации пресса К9538 (*1*) и расчетная технологическая нагрузка (*2*); *S* – толщина металла

Штамповка осуществляется на агрегате ПВШМ 5 т – пресс обрезной К9538 силой 6,3 МН. Доделочная операция выполняется в специальном трехпозиционном штампе для обрезки облоя, прошивки полости и пробивки перемычки (рис. 8).

Процесс глубокой прошивки, как показала практика, полностью обеспечивается энергосиловыми характеристиками используемого обрезного пресса, что также прогнозируется данными компьютерного моделирования (рис. 9).

При штамповке поковки "фланец" сокращаются расход металла на 7...12 %, трудоемкость станочной обработки на 30 %. Новый способ штамповки может быть применен для изготовления полых поковок высоких ступиц с соотношением внутреннего и наружного диаметров ступичной части 0,4...0,6.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ковка и штамповка:** справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов и др. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2. Горячая штамповка / под ред. Е.И. Семенова. 1986. 592 с.

2. **Катрич Ю.П.** Комбинированное выдавливание сдвигом / Кузнечно-штамповочное производство. 2005. № 3. С. 22–28.

3. **А. с. СССР № 99012.** 49i, 16. Способ горячей штамповки с прошивкой глубоких отверстий в высокой ступице.

4. **Заявка на изобретение №2007108845 РФ, МПК B21K1/40, B21J 5/10.** Способ изготовления поковки с высокой ступичной частью, имеющей глубокую полость, горячей штамповкой / Б.Г. Каплунов, В.М. Тяжельников, И.Н. Гиляжев и др. Заявл. 09.03.2007 г. Решение РОСПАТЕНТА о выдаче патента от 24.06.08.

5. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611951 "Проектирование предварительной поковки в технологии молотовой штамповки полых поковок типа ступица с фланцем (Ступица)". Правообладатели: К.В. Анненков, В.М. Тяжельников, Б.Г. Каплунов. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 20.03.2008 г.

6. **Полищук Е.Г., Жиров Д.С., Вайсбурд Р.А.** Система расчета пластического деформирования РАПИД / Кузнечно-штамповочное производство. 1997. № 8. С. 16–19.

7. **Ресурсосберегающие** технологии мелкосерийного производства горячештампованных поковок / Б.Г. Каплунов, В.М. Тяжельников, И.Я. Пыжов и др. // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения, кузнечно-штамповочного производства и обработки материалов давлением – основы машиностроительного комплекса и национальной безопасности России. Сб. докл. и матер. VIII Конгресса "Кузнец-2008". Рязань: ООО "Политех", 2008. С. 240–256.

Вячеслав Михайлович Тяжельников, инженер;
Борис Григорьевич Каплунов, д-р техн. наук

УДК 621.771.63-417.2

А.Г. Сербин, И.Е. Семёнов *(Московский государственный индустриальный университет, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

Моделирование процесса вырубки листового металла эластичной средой*

Приведены результаты теоретического анализа процессов разделения тонколистового металла эластичной средой.

The results of theoretical analysis of the process slashing the sheet metal by rubber-band ambience are presented.

Ключевые слова: вырубка; эластичная среда; математическая модель; конечно-элементная модель.

Key words: slash; rubber-band ambience; mathematical model; finite-element model.

Операции вырубки-пробивки являются одними из наиболее распространенных технологических операций в листовой штамповке. Габаритные размеры плоских деталей (заготовок) изменяются от нескольких миллиметров до нескольких метров, а по толщине от 0,03 до 25 мм. Верхний предел разделения деталей (заготовок) по толщине и габаритным размерам ограничивается мощностью имеющегося на предприятии парка оборудования (прессов) и размерами стола пресса, а нижний – точностью штамповой оснастки.

Широкое распространение получили процессы разделения тонколистового металла эластичной средой. При этом номенклатура обрабатываемых материалов и толщин достаточно большая.

В штампах с использованием эластичного инструмента можно разделять листовые материалы из алюминиевых сплавов, меди, латуни толщиной до 3 мм; алюминиевые сплавы, латуни, бронзы, углеродистые стали толщиной до 2...2,5 мм; коррозионно-стойкие стали, титановые и магниевые сплавы – до 1,5 мм. Возможно использование и листовых заготовок больших толщин, однако при этом резко снижается качество поверхности среза, особенно у малопластичных материалов, таких как титановые, магниевые сплавы и закаленные алюминиевые сплавы марок Д16АТ, В95АТ и др.

Важно, что наименьшая толщина материала практически не ограничена: из тонкой алюминиевой фольги толщиной 0,05...0,1 мм получают детали с высоким качеством поверхности среза, без заусенцев и заметного искажения, при этом стоимость изготовления штампа увеличивается незначительно. Однако в случае с "жесткими" инструментальными штампами уменьшение толщины обрабатываемого металла ведет к резкому удорожанию штампа.

Широкому внедрению процессов резки эластичной средой препятствовало то, что материалы, применяемые в качестве эластичной среды (в основном резины), обладали низкими физико-механическими характеристиками и малой стойкостью к усталостному разрушению. Новые технологии и материалы (полиуретан, высокомолекулярная резина и т.д.) позволили существенно улучшить параметры эластичного рабочего инструмента, что дало новый толчок к распространению данного вида обработки.

Для разделительных операций эластичной средой применяют универсальный штамп (рис. 1), который состоит из контейнера *1*, промежуточной металлической шайбы *2* толщиной 5...10 мм и полиуретановой подушки *3*, запрессованной в полость контейнера. Для извлечения подушки из контейнера в днище контейнера предусмотрено отверстие.

Листовую заготовку *4* устанавливают на вырезной шаблон *5*, помещенный на подштамповой плите *7*, расположенной на столе пресса. Для регулирования глубины отверстия в шаблоне под пробивку применяют сменный вкладыш *6*.

Для увеличения срока службы полиуретановой подушки боковой зазор между поверхностями контей-

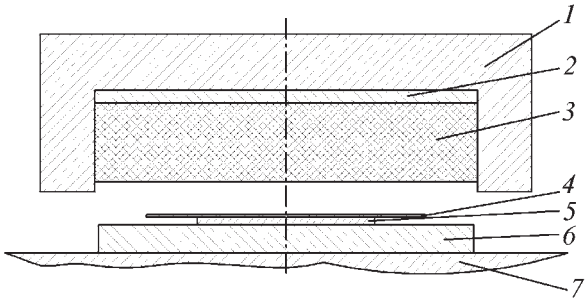


Рис. 1. Схема универсального штампа для разделительных операций, выполняемых эластичным материалом

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию Министерства науки и образования РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)" на 2008 г.

нера и шаблона не должен превышать 0,2...0,3 мм. Так как эластичный инструмент в разделительных операциях заменяет одну из рабочих жестких частей обычного штампа – пуансон или матрицу, то разделение материала происходит только на одной режущей кромке, что вносит существенные изменения в механизм деформирования.

Проектирование и отладка технологического процесса разделения тонколистового металла эластичной средой достаточно трудоемки. Внедрение вычислительной техники позволяет сократить время при разработке технологии листовой штамповки благодаря математическим моделям процесса, позволяющим в зависимости от геометрических параметров детали и характеристик материала определять напряженно-деформированное состояние заготовки на любом этапе технологического процесса.

Применение программ, в основу которых заложен метод конечных элементов, позволяет оценить напряженно-деформированное состояние заготовки без упрощающих гипотез в условиях, близких к реальным. При этом возможно с высокой степенью точности заменять реальные физические модели сложных технологических процессов их компьютерным аналогом.

В представленной исследовательской работе использовали многоцелевой конечно-элементный пакет ANSYS-LS-DYNA/STRUCTURAL, предоставленный МГТУ им. Н.Э. Баумана московским представительством фирмы CAD-FEM GmbH, применяемый при моделировании высоколинейных и нелинейных процессов.

При описании и расчете процесса разделения тонколистового металла необходимо было учесть два основных фактора:

– нелинейность свойств эластичной среды (полиуретана) и заготовки;

– выбор критерия разрушения материала заготовки.

Для адекватного моделирования полиуретана использовали теорию Муни-Ривлина, которая позволяет с помощью восьми коэффициентов описывать физико-механические параметры эластомеров, учитывать изменение их деформационных свойств и значений условного модуля упругости при степенях деформации 100 % и более.

В общем виде определяющее соотношение Муни-Ривлина представляет собой модель поведения несжимаемых натуральных резиноподобных материалов, содержит до 10 определяющих коэффициентов. При деформировании эластичной оболочки со степенями деформации до 30 % для адекватного описания процесса достаточно двух коэффициентов C_1 и C_2 [1].

При этом функция плотности энергии деформации имеет следующий вид:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) + S_k(I_3^2 - 1)^2,$$

где C_1, C_2 – константы кубического выражения Муни-Ривлина; $S_k = 2(C_1 + C_2)/(1 - 2\nu)$ – объемный модуль; ν – коэффициент Пуассона; I_1, I_2, I_3 – редуцированные инварианты деформации в i-м направлении, заданные следующим образом: $I_1 = I_1 I_3^{-1/3}$; $I_2 = I_2 I_3^{-1/3}$; $I_3 = I_3^{1/2}$.

Рекомендованным подходом для корректного описания процесса разделения материалов является феноменологический критерий накопления повреждений В.Л. Колмогорова [2].

В случае применения этого критерия для описания процессов разрушения используют диаграмму пластичности материала, которая связывает предельную деформацию сдвига от жесткости напряженного состояния, коэффициента напряженного состояния (коэффициента Лодэ) и температуры.

По диаграмме пластичности в каждый момент времени вычисляется предельная деформация сдвига, суммируется с накопленной к этому времени деформацией и определяется: исчерпал пластичность элемент материала или нет. В LS-DYNA единственной моделью материала, учитывающей критерий разрушения Колмогорова, является модель Джонсона-Кука.

Приняли следующие допущения:

1. Температура в течение процесса разделения не меняется.

2. Скорости деформации малы.

Для описания поведения материала заготовки алюминия АД1 использовали билинейную изотропную упругопластическую модель со следующими механическими характеристиками: предел текучести $\sigma_т$ = 30 МПа; модуль упругости первого рода E = = $1{,}0 \cdot 10^5$ МПа; модуль упрочнения $E_у$ = 110 МПа; коэффициент Пуассона ν = 0,31; плотность ρ = = 2710 кг/м^3.

Ввиду существенных геометрических нелинейностей (деформация полиуретана), а также нелинейностей, связанных с учетом разрушения материала и больших конечных (пластических) деформаций, предусмотрено r-адаптивное перестроение КЭ-сетки заготовки.

В силу осевой симметрии процесса, а также незначительного перемещения элементов, описывающих полиуретан в меридиональном направлении (которые пренебрежимо малы по отношению к главным деформациям), получили решение в плоскодеформированной постановке.

На рис. 2 приведена схема процесса разделения тонколистового металла эластичной средой. Эластич-

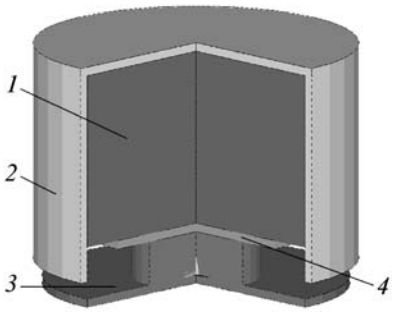


Рис. 2. Схема процесса разделения тонколистового металла эластичной средой

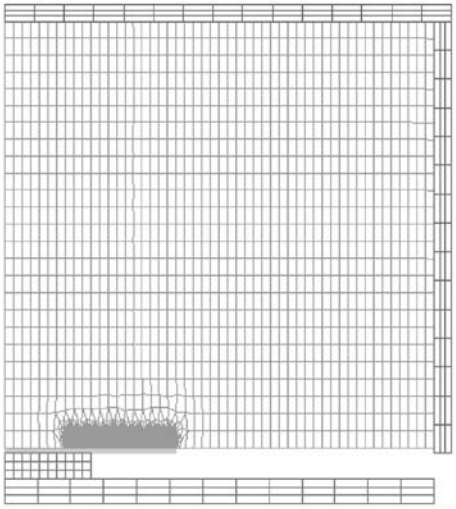


Рис. 3. Конечно-элементная модель процесса вырубки жестким пуансоном

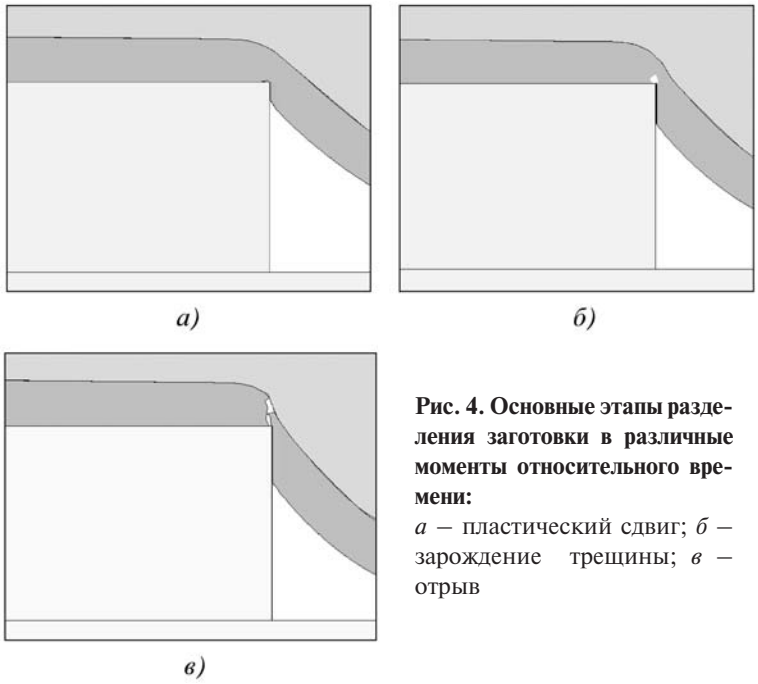


Рис. 4. Основные этапы разделения заготовки в различные моменты относительного времени:
а – пластический сдвиг; *б* – зарождение трещины; *в* – отрыв

ная среда *1* (полиуретан СКУ-ПФЛ) заключена в подвижный контейнер *2*. На неподвижном жестком пуансоне *3* размещена тонколистовая алюминиевая заготовка *4* толщиной 0,5 мм. Было разработано и проанализировано более 10 различных математических моделей, в которых варьировались геометрические параметры заготовки и неподвижного жесткого пуансона.

Конечно-элементная модель процесса вырубки заготовки диаметром 40 мм на пуансоне диаметром 20 мм в начальный момент времени показана на рис. 3.

Коэффициент трения между полиуретаном и подвижной матрицей, а также полиуретаном и заготовкой принимали равным 0,14, между заготовкой и неподвижным пуансоном 0,1.

Процесс разделения тонколистового металла состоит из четырех основных этапов: пластический сдвиг, зарождение трещины, отрыв и хрупкое разрушение (рис. 4 и 5).

На рис. 6 приведены поля осевых напряжений в заготовке (рис. 6, *а*), значения которых не превышают 170 МПа в любой момент времени. Осевые напряжения σ_y максимальны в момент образования трещины в заготовке.

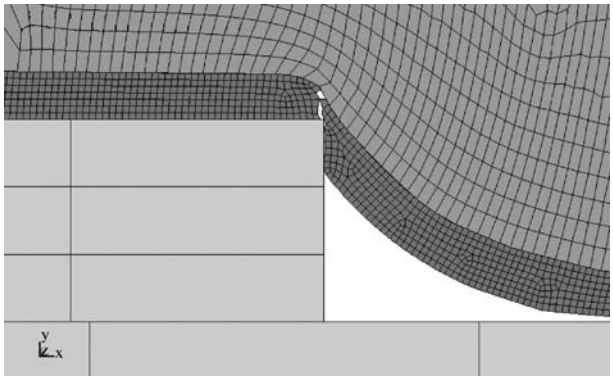


Рис. 5. Конечный момент хрупкого разрушения

На рис. 7 приведены поля интенсивности пластических деформаций в заготовке, значения которых максимальны в момент отрыва свободных кромок от основного массива металла заготовки и не превышают 96 %.

Возможности конечно-элементного пакета ANSYS/Structural по моделированию процессов в условиях больших пластических деформаций и развивающейся зоны контакта делают данный пакет серьезным инструментом при технологической подготовке производства. Полученная точность определения

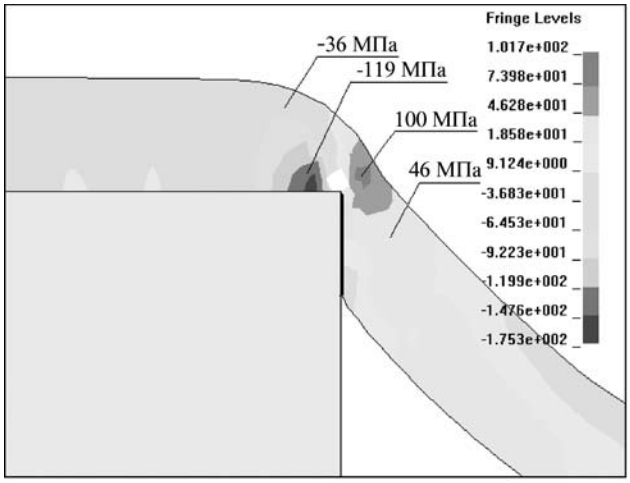


Рис. 6. Поля осевых напряжений σ_y в момент зарождения первой трещины в заготовке (t = 0,034 с)

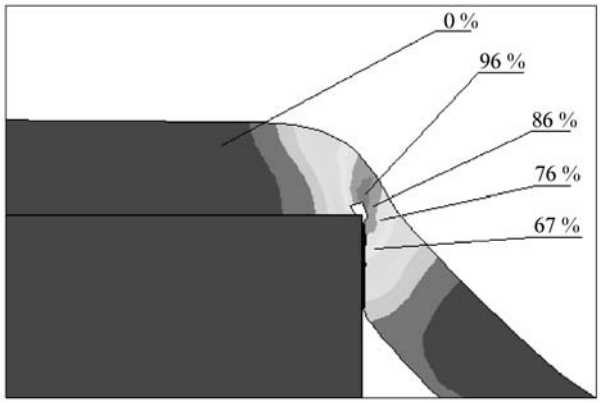


Рис. 7. Поля интенсивности пластической деформации ε_i в момент зарождения первой трещины в заготовке

напряженно-деформированного состояния удовлетворяет минимальным технологическим требованиям (расхождение с экспериментальными данными составляет не более 15 %).

Таким образом, применение разработанных математических моделей для расчета основных технологических параметров процесса вырубки (утяжины, блестящего пояска, скола, сил, напряжений и т.п.) в зависимости от механических характеристик материала является перспективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Семёнов И.Е., Чеканова О.Р., Сербин А.Г.** Определение напряжений на поверхности эластичной оболочки инструмента для листовой штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 2004. № 6. С. 25–28.

2. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 687 с.

Антон Григорьевич Сербин, канд. техн. наук;
Иван Евгеньевич Семёнов, д-р техн. наук

С.А. Петриков *(ОАО "Дорогобужкотломаш", пос. Верхнеднепровский, Смоленская обл.)*

Технология изготовления теплообменных поверхностей в трубах для паровых и водогрейных котлов и теплообменных аппаратов

Приведены конструктивные решения по интенсификации теплопередачи в трубах конвективного теплообмена для ТЭС, энергоустановок и промышленных котельных. Определены пути реализации технологических процессов по изготовлению энергоэффективных по теплообмену труб.

The ways of intensification of heat transfer in convectional heat exchange pipes are presented with the purpose of increasing functional and economic efficiency of the equipment for such branches as electric power industry (thermal and nuclear stations), power system (steam and water-heating boilers), shipbuilding, petrochemical industry, refrigerating technics, desalination of sea water and in the heat exchange devices of food machine building.

Ключевые слова: теплообменные аппараты; теплопередача; турбулизация; теплоноситель; трубы; интенсификация; конструкция; технология.

Key words: heat exchanging devices; heat transfer; turbulization; heat-carrier; pipes; intensification; design; technology.

Гарантированное обеспечение потребителей тепловой энергией, решение вопросов энергосбережения неразрывным образом связано с одной из глобальных проблем, возникшей в последнее время, – энергодефицитом.

Проблемы теплопередачи в котлах, водоподогревателях, охладителях, утилизаторах и других теплообменных аппаратах в условиях усиленного роста цен на энергоносители в центре внимания и конструкторов, и эксплуатационников. Развитые поверхности теплообмена и закрутка потоков теплоносителей в теплопередающих трубах является магистральным направлением технического прогресса в этой сфере.

В статье представлены решения по интенсификации теплопередачи в трубах конвективного теплообмена, выполненные в целях повышения функциональной и экономической эффективности оборудования для таких отраслей, как электроэнергетика (тепловые и атомные станции), теплоэнергетика (паровые и водогрейные котлы), судостроение, нефтехимическая промышленность, холодильная техника, опреснение морской воды и в теплообменных аппаратах пищевого машиностроения.

Современная теория конвективного теплообмена базируется на теории пограничного слоя (L. Prandtl. Gesammelte Abhandlungen zur angewanten Mechanic, Hydro- and Aerodynamic. 1961). На поверхностях твер-

дого тела жидкие или газообразные среды имеют тенденцию образовывать устойчивый пограничный слой, который плотно примыкает к теплопередающей поверхности. Пограничные слои характеризуются существенным градиентом температуры и определяют перенос теплоты между теплоносителем и разделительной стенкой. За пределами теплового пограничного слоя, т.е. в ядре теплового потока, переноса теплоты не происходит и, следовательно, для интенсификации теплообмена необходимо создавать в пограничном слое турбулентные вихревые потоки, приводящие к обрыву сплошности пограничного слоя и уменьшению его толщины.

Основываясь на механизме зарождения турбулентности в потоке теплоносителя и характере изменения теплопередачи, с учетом открытия советских ученых (Э.К. Калинин и др. Закономерности изменения теплоотдачи на стенках каналов с дискретной турбулизацией потока при вынужденной конвекции. Открытие № 242 по заявке № ОТ-9357 от 11.10.76 г.), и на анализе литературных данных отечественных и зарубежных авторов созданы принципиально новые конструкции и технологические процессы изготовления труб конвективного теплообмена с защитой разработанных решений патентами РФ [1, 2].

В трубопроводном канале теплообменной трубы (рис. 1, *а*) поток теплоносителя турбулизируется в пристеночных слоях за счет создания периодически расположенных инициаторов вихревых зон, т.е. спиралевидно расположенных многозаходных канавок, глубина которых 0,3...0,8 мм и сопоставима с толщиной ламинарного слоя, ответственного за максимальное термическое сопротивление. Шаг спиралевидного витка канавки равен внутреннему диаметру трубы.

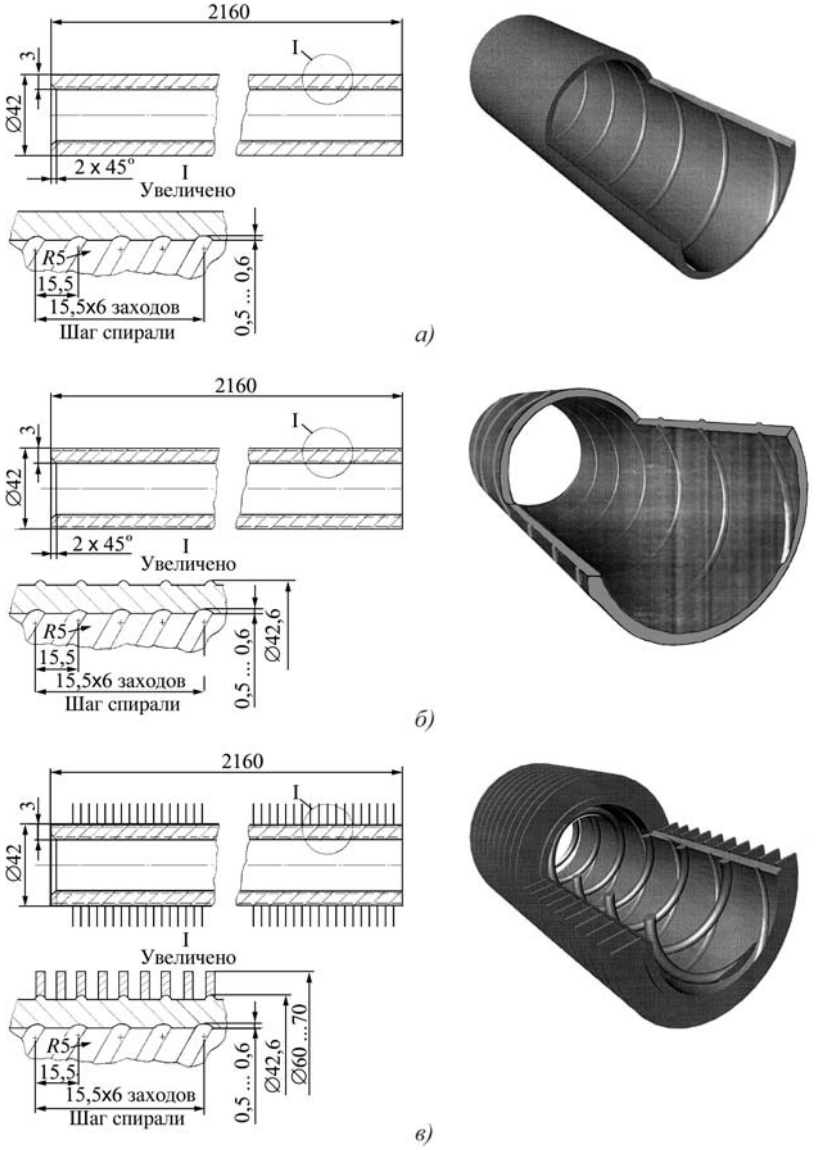


Рис. 1. Конструкции теплообменных труб с многозаходными спиралевидно направленными канавками для теплоагрегатов:
а – во внутренней полости; *б* – во внутренней полости и следами выпоров на наружной поверхности; *в* – с оребрением металлическими дисками наружной поверхности

Эффективность разработанного конструктивного решения выражается в том, что скорость теплопередачи в трубе с многозаходными спиралевидно расположенными канавками, вызывающими принудительную конвекцию в пограничном слое, выше, чем в трубе со свободной конвекцией за счет уменьшения толщины ламинарного пограничного слоя, увеличения площади внутренней поверхности трубы, увеличения длины и времени прохождения теплоносителя. При этом завихрение теплоносителя в ламинарном слое обеспечивает вынос твердых частиц, содержащихся в теплоносителе, за пределы теплообменного аппарата.

Приведенная на рис. 1, *б* конструкция конвективной трубы с внутренними спиралевидными поверхностями и спиралевидными следами выпоров на наружной поверхности обеспечивает как внутреннюю, так и внешнюю турбулизацию потоков теплоносителей в пограничных слоях, что создает дополнительный эффект.

Конструкция трубы с внутренней многозаходной системой спиралевидно расположенных канавок и ответной (эквидистантной) системой наружных выпоров позволяет запрессовывать располагаемые в осевом направлении металлические диски (рис. 1, *в*), внутренний диаметр которых равен номинальному диаметру трубной заготовки.

Прочность соединения металлического диска с трубой определяется силами сцепления, развивающимися на контактных поверхностях узла по мере возрастания разности диаметрального размера выпора на трубе и внутреннего диаметра диска, т.е. характеризуется величиной натяга.

Оребренная теплообменная труба обладает суммарным увеличением активной поверхности нагрева, создает добавочную турбулизацию как внешнего, так и внутреннего потоков теплоносителей, обеспечивает эксплуатационную надежность, снижает себестоимость изготовления за счет исключения специализированного оборудования, выполняющего операции нагрева ТВЧ, навивки ленты и ее приварки.

Металлические диски для оребрения труб можно применять различной конструктивной формы — круглой, многогранной или овальной, которые изготовляются штамповкой. Применение металлических дисков овальной или многогранной формы обеспечит сборку пучка труб с меньшим межцентровым расстоянием между трубами, что позволит повысить компактность теплообменной зоны аппарата.

Конструкция оребренной трубы и технология изготовления защищены патентом РФ [1].

Для более интенсивного динамического, теплового и массового взаимодействия между потоком теплоносителя и внутренней поверхностью трубы была разработана принципиально новая конструкция дымогарных труб для жаротрубных стальных водогрейных котлов, выпускаемых ОАО "Дорогобужкотломаш" [2].

Дымогарная труба (рис. 2) снабжена расположенным в ее полости турбулизатором, выполненным в виде навитой из жаропрочной проволоки или ленты спирали, зафиксированной в осевом направлении. На внутренней теплообменной поверхности трубы выполнены спиралевидно расположенные многозаходные канавки, направление которых противоположно направлению спирали турбулизатора. При этом профиль спиралевидно направленной канавки выполнен в виде радиусного сопряжения двух прямых лучей с углом между ними более 90°.

Профиль канавки характеризуется заходной поверхностью *a* и торцовой поверхностью *b*. На входе теплоносителя в канавку (поверхность *a*) скорость его движения практически равна скорости завихренного турбулизатором *2* газового теплоносителя. Далее, у торцовой поверхности (поверхность *b*) вследствие торможения потока теплоносителя давление повышается, происходит создание в пограничном слое возвратных и перекрещивающихся вихревых газовых потоков, приводящих к разрыву сплошности пограничного слоя и выбросу газа из области замедленного течения в верхние слои. Этот выброс, с одной стороны, интенсифицирует порождение турбулентности в пограничном слое, а с другой стороны, обеспечивает выброс порции холодного газа из пограничного слоя в ядро горячего газа.

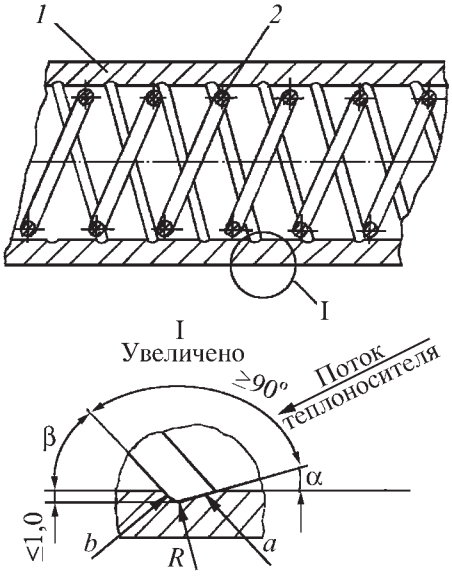


Рис. 2. Конструкция дымогарной трубы:
1 – труба конвективного теплообмена с одно- или многозаходными канавками; *2* – спиральный завихритель потока теплоносителя

Угол ≥ 90° в канавке между заходной и торцовой поверхностями в сечении по нормали к спиралевидному направлению канавки выбран исходя из технологических возможностей ее изготовления, а также чтобы тепловой поток на теплопередающую поверхность трубы *1* и характер изменения температуры газового потока периодически меняли свое направление, т.е. внутренняя поверхность трубы в канавке выполняла роли и нагреваемой, и греющей поверхности.

Так как теоретически рассчитанная толщина пограничного слоя у стенки гладкоствольной трубы не превышает 0,73 мм, рекомендуемая глубина канавки 1,0 мм.

Эффективность разрушения ламинарного потока пограничного слоя в трубах конвективного теплообмена при использовании в качестве возмущающего фактора каверн различной геометрической формы, расположенных на внешней теплообменной поверхности трубы, и эквидистантно им расположенных выпоров на внутренней поверхности трубы существенно зависит от их количества и расположения по длине трубы. На рис. 3 показана труба с кавернами и выпорами на теплообменных поверхностях.

Тепловая производительность трубы при падении давления и температуры газового теплоносителя в котле по мере его прохождения по каналу с регулярным рельефом тепловоспринимающей и теплопередающей поверхностями снижается. Так, например, при скорости движения газа в жаровых трубах котла КВ-ГМ-0,15-115Н на входе – 4,3 м/с, на выходе – 2,7 м/с, давление газа приблизительно 160 Па. Усред-

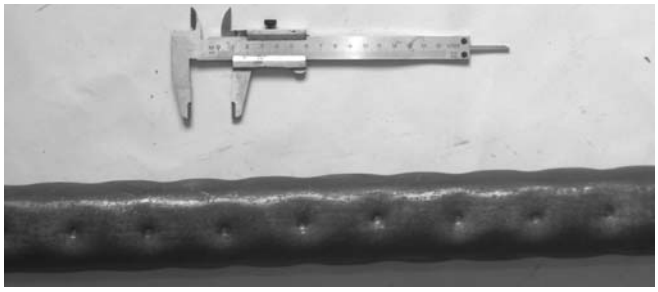


Рис. 3. Конвективная труба с кавернами и выпорами на теплопередающих поверхностях

нить скорость можно увеличением расхода рабочей среды и температурного напора, но это экономически невыгодно, а во многих случаях просто нереализуемо. Поэтому была поставлена цель разработать конструкцию дымогарной конвективной трубы, обеспечивающей равномерное использование эффекта теплопередачи между газообразным и жидкостным теплоносителями по мере падения температуры по длине трубы. Нами разработана дымогарная труба в виде "кукурузного" исполнения, у которой плотность рельефа из каверн и выступов увеличивается по мере снижения температуры протекающего по ней газообразного теплоносителя.

Технология изготовления теплообменных поверхностей в трубных заготовках. Разработка технологических процессов изготовления энергоэффективных теплообменных труб представляет собой решение комплексной задачи, включающей определение величины, направления и сопротивления пластической деформации обрабатываемого материала, выбор рациональных технологических схем обработки, подбор оборудования и разработку средств технологического оснащения.

На основании изучения влияния условий обработки на пластические деформации (их величину, направление и скорость) и на напряжения (силу и работу, необходимые для их осуществления), свойств обрабатываемого материала и анализа качественных характеристик поверхностного слоя обработанных поверхностей разработана промышленная технология изготовления длинномерных теплообменных труб.

В качестве основного оборудования для осуществления экономически эффективных технологических вариантов обработки спиралевидных поверхностей в трубах приняты станки токарной группы, располагающие механизмами кинематической связи заготовки и формообразующих инструментов, а для формирования каверн и выпоров – гидравлический пресс вертикального исполнения.

На рис. 4 представлены технологический вариант изготовления теплообменной трубы с внутренними многозаходными спиралевидными поверхностями и вид технологической оснастки. Отличительной особенностью технологии изготовления длинномерных труб является вынос зоны обработки за габаритные размеры станка.

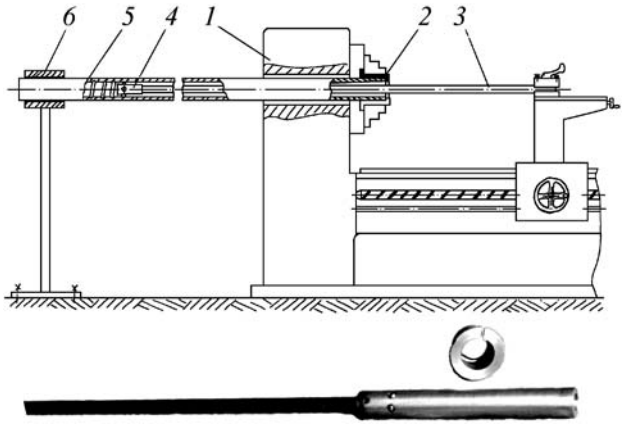


Рис. 4. Технологический вариант изготовления теплообменной трубы с внутренними многозаходными спиралевидными поверхностями и вид технологической оснастки:
1 – токарно-винторезный станок; *2* – разжимная втулка; *3* – тяга; *4* – инструментальная головка; *5* – трубная заготовка; *6* – выносной люнет

Вариант изготовления теплообменной трубы с оребрением металлическими дисками изображен на рис. 5.

Оребрение теплообменной трубы по разработанному и защищенному патентом РФ на изобретение № 2182052 технологическому процессу осуществляется на токарно-винторезном станке в следующей последовательности. Трубную заготовку *3* с размещенными на ней отдельными металлическими дисками *4* устанавливают в ложементе гребенки *5*, обеспечивающем осевую фиксацию стальных дисков вдоль оси трубной заготовки *3* с шагом *t*. Гребенка *5* закреплена на станине токарно-винторезного станка.

Трубная заготовка *3* через разрезную втулку *2*, имеющую кольцевой буртик для предотвращения осевого сдвига трубы в процессе формообразования, крепится в патроне *1* токарно-винторезного станка и поддерживается люнетом *8*. В полость трубной заготовки вводят со стороны задней бабки станка оправку *9*, со-

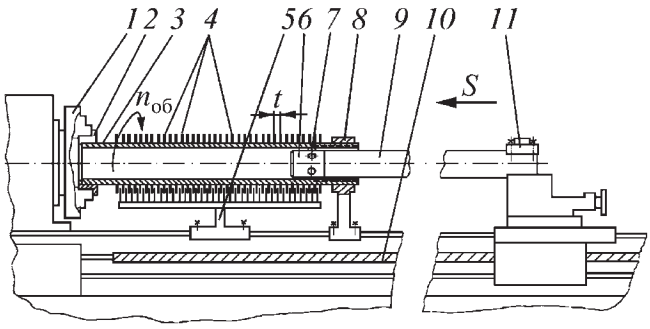


Рис. 5. Технологическая схема по оребрению теплообменной трубы металлическими дисками

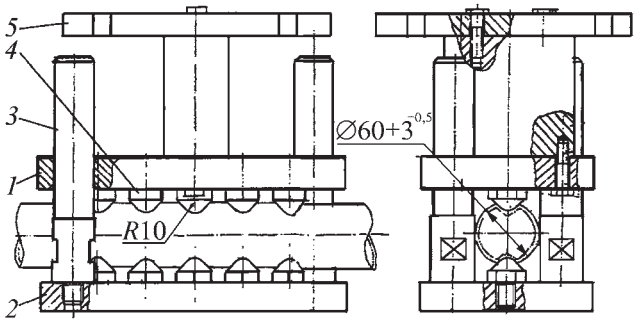


Рис. 6. Конструкция штампа для формообразования сферических вогнутостей и выпуклостей на теплообменных поверхностях трубы

единенную с раскатной головкой *6*, оснащенной давильным инструментом с формообразующими телами сферической формы *7* или вращающимися роликами, выставленными на требуемый размер канавок и выпоров в стенке трубной заготовки. Другой конец оправки *9* крепится в суппорте *11* станка.

Трубной заготовке *3* сообщают вращение со скоростью $n_{об}$, согласованное с осевой подачей *S* оправки *9* с раскатной головкой *6* вдоль оси трубы от ходового винта *10* токарного станка. Формообразующие тела *7* раскатной головки *6* формируют многозаходные спиралевидные канавки во внутренней полости трубы, а спиралевидные выпоры на ее наружной поверхности закрепляют металлические диски *4*.

Формирование каверн и выпоров различной формы, плотности, осевого или винтообразного расположения на теплообменных поверхностях труб с толщиной стенки до 3,5 мм осуществляется на гидравлическом прессе вертикального исполнения мод. П474А силой 1 МН (наибольший ход ползуна 550 мм; рабочая скорость движения ползуна 10 мм/с; скорость холостого хода ползуна 70 мм/с).

Для формирования каверн и выпоров на толстостенных трубных заготовках (∅60×3 мм) создан штамп (рис. 6) для одновременной обработки 10 каверн с последующей шаговой перестановкой трубы и проведения операции по вдавливанию следующих 10 каверн.

Базовыми элементами однооперационного штампа являются несущие плиты *1* и *2*, которые в комплекте с четырьмя направляющими колоннами *3* образуют блок. На подвижной и неподвижной плитах *1* и *2* размещены по пять конических давильников *4*, изготовленных из инструментальной стали с твердостью 56...60 HRC.

Ограничение хода подвижных деталей штампа осуществляется с помощью двух стержневых ограничителей.

Верхняя часть штампа *5* крепится к ползуну пресса четырьмя болтами, а нижняя плита *2* – с помощью прихватов к столу пресса.

Штучное время по формированию каверн и выпоров на 3-метровой трубе ∅60×3 мм составляет не более 15 мин.

Геометрические формы и размеры лунок и выпоров, образующих регулярный рельеф на теплопередающих поверхностях конвективной трубы, способствуют интенсификации тепло- и массообмена.

Выводы

1. В работе представлены конструкторско-технологические решения, способствующие созданию нового поколения теплофикационных аппаратов с повышенной активностью тепловых зон.

2. Разработаны принципиально новые конструкции труб конвективного теплообмена с оптимизацией их по факторам "технологичность" и "служебная эффективность". В их числе базовые типы теплообменных труб – трубы с многозаходной системой канавок на теплообменных поверхностях и трубы с рядным расположением каверн и выпоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2182052 РФ, МПК.** Способ изготовления оребренной конвективной трубы теплообменного аппарата / С.А. Петриков, Н.Б. Серов, Н.Н. Хованов, А.П. Черный, Р.К. Курмаев. Опубл. 2002. Бюл. № 13.

2. **Пат. 2197683 РФ, МПК 7 F 22 B 9/00, F 28 F 13/02.** Дымогарная труба теплообменного аппарата / С.А. Петриков, Н.Б. Серов, Н.Н. Хованов, В.В. Петров. Опубл. 27.01.2003. Бюл. № 3.

Сергей Анатольевич Петриков, канд. техн. наук, генеральный директор

М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов
(ЗАО "Уральский инжиниринговый центр", г. Челябинск)

Влияние уравновешивающих гидроцилиндров на работу гидравлического ковочного пресса

Приведены результаты аналитического исследования работы ковочного пресса, в конструкции которого уравновешивающие гидроцилиндры использованы по прямому назначению и в качестве дополнительных возвратных.

The article stipulates the results of analytical survey of operation of forging press, in the design of which counterbalancing hydraulic cylinders are used both for the direct purpose and as additional elevating cylinders.

Ключевые слова: гидравлический пресс; гидропривод подвижной траверсы; уравновешивающие гидроцилиндры; математическое моделирование; переходные процессы.

Key words: hydraulic press; hydraulic drive of elevating beam; counterbalancing cylinders; mathematical simulation; transient processes.

Уравновешивающие гидроцилиндры в конструкциях прессов появились в то время, когда широко применяли паровой и воздушный приводы. Использование пара и воздуха в качестве рабочей среды для возвратных (подъемных) цилиндров мощных прессов было невыгодно энергетически и экономически. Это связано с тем, что по окончании рабочего хода подвижной траверсы пресса плунжеры возвратных цилиндров почти никогда не оказываются в своем крайнем втянутом положении, и при каждом подъеме траверсы соответствующий объем их рабочей полости должен заполняться паром или воздухом высокого давления, энергия которого при последующем расширении (во время холостого и рабочего ходов) теряется. Поэтому на прессах с паровым или воздушным приводами с большими номинальными силами применяли в основном гидравлические возвратные цилиндры, рабочая жидкость высокого давления подавалась в них с помощью насосно-аккумуляторной установки (НАС) соответствующей мощности, используемой также для гидроприводов выдвижного стола и выталкивающего устройства [1].

Применение в таких условиях в конструкции пресса уравновешивающих гидроцилиндров позволяло использовать в составе НАС насосы со значительно меньшей установочной мощностью.

Номинальное относительное уменьшение установочной мощности насосов НАС можно оценить с помощью следующего соотношения:

$$N_2/N_1 = n_в A_в/(n_в A_в + n_у A_у),$$

где N_1, N_2 – потребная установочная мощность насосов НАС гидравлического пресса при отсутствии уравновешивающих гидроцилиндров и при их наличии соответственно; $n_в$, $A_в$ – количество возвратных гидроцилиндров и эффективная площадь их плунжера соответственно; $n_у$, $A_у$ – количество уравновешивающих гидроцилиндров и эффективная площадь их плунжера соответственно.

При $n_в/n_у = 1$ и $A_в/A_у = 4$ в соответствии с приведенной формулой получим $N_2/N_1 = 0{,}8$, т.е. применение уравновешивающих гидроцилиндров позволяет уменьшить потребную установочную мощность насосов НАС на величину, достигающую 20 % ее исходного значения N_1.

Для гидравлических прессов относительная экономия потребного объема рабочей жидкости высокого давления (без учета ее утечек и упругих деформаций элементов пресса) за один цикл работы пресса (холостой ход – рабочий ход – обратный ход) при применении уравновешивающих гидроцилиндров

$$(V_1 - V_2)/V_1 = n_у A_у (h_р + h_{х.х})/[A_{рΣ} h_р + (n_в A_в + n_у A_у)(h_р + h_{х.х})],$$

где V_1, V_2 – потребный объем рабочей жидкости высокого давления за один цикл работы гидравлического пресса при отсутствии уравновешивающих гидроцилиндров и при их наличии соответственно; $A_{рΣ}$ – суммарная эффективная площадь плунжеров рабочих гидроцилиндров; $h_{х.х}$, $h_р$ – перемещения подвижной траверсы пресса во время холостого и рабочего ходов соответственно.

При $n_в/n_у = 1$, $A_в/A_у = 4$ и $A_{рΣ}/(n_у A_у) = 55{,}65$ (приведены данные для гидропривода подвижной траверсы ковочного пресса № 1-4657.00) при изменении $h_р/(h_р + h_{х.х})$ в пределах от 2/3 до 1 отношение $(V_1 - V_2)/V_1 =$ 0,024...0,0165. В соответствии с приведенными данными применение уравновешивающих гидроцилиндров на гидравлическом ковочном прессе хотя и позволяет снизить потребление рабочей жидкости высокого давления, но несущественно и в результате практически не влияет на установочную мощность насосов НАС.

В работе [2] отмечается, что при наличии в конструкции пресса уравновешивающих гидроцилиндров

уменьшается абсолютная величина ускорений, возникающих на начальном этапе свободного опускания (холостого хода) подвижной траверсы пресса, и в результате снижается вероятность нарушения сплошности потока рабочей жидкости, поступающей в полости рабочих гидроцилиндров из наполнительного бака.

Однако само по себе применение уравновешивающих гидроцилиндров еще не гарантирует исключения нарушения сплошности потока рабочей жидкости на этапе свободного опускания подвижной траверсы. Эта проблема может быть полностью решена при использовании в гидроприводе пресса регулирующего сливного клапана возвратных гидроцилиндров (или дополнительного регулируемого дросселя [3]), посредством которого (в результате постепенного открытия его проходного сечения) при организации соответствующего управления можно обеспечить необходимый закон движения подвижной траверсы на начальном этапе ее свободного опускания.

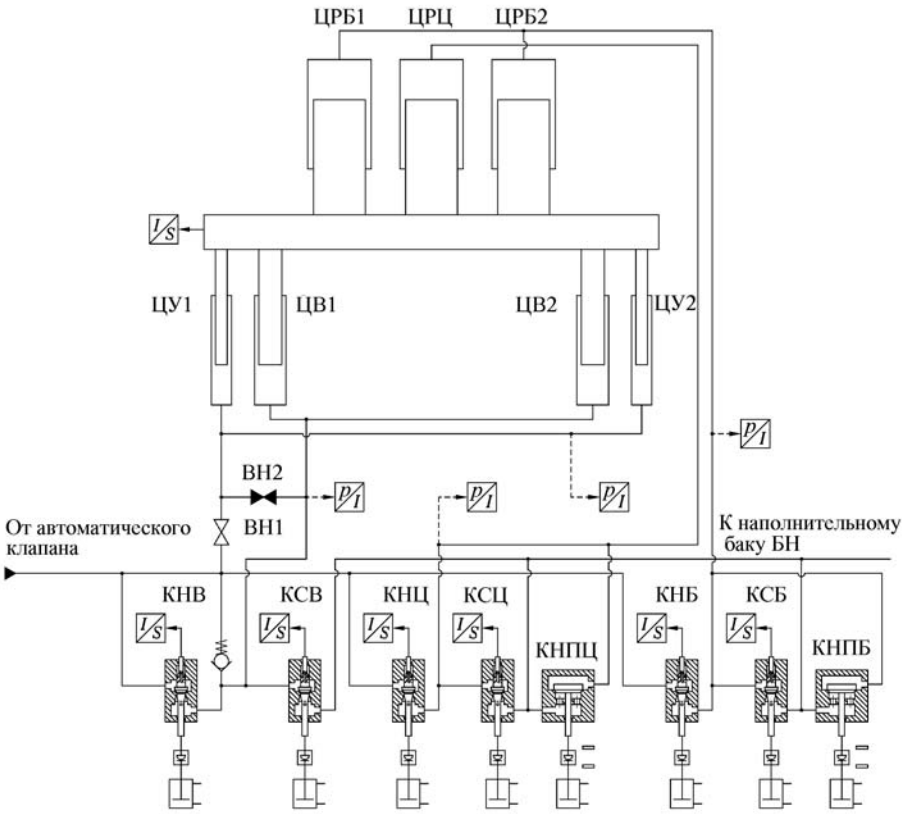


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема модернизированной электрогидравлической системы управления пресса № 1-4657.00 (фрагмент)

Таким образом, с точки зрения решения данной проблемы применение уравновешивающих гидроцилиндров не является необходимым и достаточным условием.

В соответствии с изложенным, главным преимуществом при применении уравновешивающих гидроцилиндров в гидроприводе подвижной траверсы пресса является некоторое снижение объема рабочей жидкости высокого давления, потребляемой за рабочий цикл пресса. Но, воспринимая бóльшую часть силы тяжести подвижной траверсы и движущихся вместе с ней частей пресса, уравновешивающие гидроцилиндры на величину создаваемой ими силы уменьшают максимальную силу, которая потенциально может развивать пресс. Кроме того, при равных условиях применение уравновешивающих гидроцилиндров приводит к снижению установившейся скорости опускания подвижной траверсы пресса.

В настоящее время применяют ковочные и вертикальные штамповочные гидравлические прессы, выполненные как с уравновешивающими гидроцилиндрами, так и без них. При этом прессы идентичного назначения и номинальных сил по признаку наличия или отсутствия уравновешивающих гидроцилиндров могут различаться. Так, например, в конструкции ковочного пресса ПА1345 с номинальной силой 31,5 МН производства Днепропетровского завода прессов уравновешивающие гидроцилиндры отсутствуют, а ковочный пресс № 1-4657.00 с номинальной силой 32 МН производства Уралмашзавода выполнен с уравновешивающими гидроцилиндрами.

При модернизации ковочного гидравлического пресса № 1-4657.00, установленного в кузнечно-прессовом цехе ОАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА", было предложено предусмотреть возможность подсоединения уравновешивающих гидроцилиндров к возвратным гидроцилиндрам в соответствии с принципиальной схемой, приведенной на рис. 1.

С этой целью гидропривод подвижной траверсы пресса дополнен двумя запорными клапанами (вентилями) ВН1 и ВН2, первый из которых установлен между гидролинией, соединенной с рабочими полостями уравновешивающих гидроцилиндров ЦУ1, ЦУ2, и напорной гидролинией пресса, а второй – между той же гидролинией и гидролинией, соединенной с рабочими полостями возвратных гидроцилиндров ЦВ1, ЦВ2. При открытом проходном сечении запорного клапана ВН1 и закрытом проходном сечении клапана ВН2 гидроцилиндры ЦУ1, ЦУ2 используются в качестве уравновешивающих, т.е. по своему прямому назначению. При закрытом проходном сечении клапана ВН1 и открытом проходном сечении клапана ВН2 гидроцилиндры ЦУ1, ЦУ2 выполняют функции дополнительных возвратных гидроцилиндров. Очевидно, что состояние клапанов ВН1 и ВН2, при котором проходное сечение обоих из них закрыто, при эксплуатации пресса является недопустимым.

Проведение модернизации гидросистемы и системы управления ковочного пресса № 1-4657.00 в соответствии с приведенной принципиальной схемой (см. рис. 1) запланировано на 2009 г.; в настоящее время изготовляется необходимое оборудование.

Для оценки влияния способа подключения уравновешивающих гидроцилиндров на характеристики работы данного пресса с модернизированной гидросистемой управления выполнено математическое моделирование пресса с использованием программного комплекса ПРАНС-ПК [4].

При математическом моделировании гидросистему пресса рассматривали как систему с сосредоточенными параметрами, работающую при постоянных значениях давления рабочей жидкости в начале напорной гидролинии пресса (перед автоматическим клапаном) и в наполнительном баке БН. Для описания движения жидкости в гидролиниях использовали Г-образную расчетную схему гидролинии, при этом учитывали зависимость модуля объемной упругости рабочей жидкости, содержащей в своем составе нерастворенный газ, от давления [5].

Коэффициент δ_o объемного содержания нерастворенного газа в жидкости, приведенный к нормальному атмосферному давлению, принимали постоянным. Металлоконструкции пресса считали абсолютно жесткими. Силы контактного трения в подвижных парах гидроцилиндров и направляющих подвижной траверсы принимали неизменными. Все расчеты проводили при принятом условии, что открытие проходных сечений клапанов КНЦ, КСЦ, КНБ, КСБ, КНВ, КСВ, КНПЦ, КНПБ (см. рис. 1), обусловливающих выполнение той или иной операции технологического цикла работы пресса, происходит мгновенно и на полную величину.

Согласно результатам проведенных расчетов, начало свободного опускания подвижной траверсы пресса сопровождается значительным кратковременным снижением давления $p_{ЦРЦ}$, $p_{ЦРБ}$ в полостях рабочих гидроцилиндров (соответственно центрального ЦРЦ и боковых ЦРБ1, ЦРБ2) и колебаниями скорости ее движения $v_{х.х}$ (рис. 2). Значение установившейся скорости $v_{х.х\ уст}$ свободного опускания подвижной траверсы существенно зависит от давления $p_{БН}$ в наполнительном баке БН и при применении уравновешивающих гидроцилиндров в качестве дополнительных возвратных по абсолютной величине больше, чем при использовании их по прямому назначению (рис. 3, *в*). Данное отличие скоростей уменьшается с увеличением давления $p_{БН}$ и не может считаться существенным обстоятельством, поскольку при работе пресса величина холостого хода подвижной траверсы относительно невелика.

Разумеется, что при одном и том же значении давления в наполнительном баке давление в полостях рабочих гидроцилиндров на этапе свободного опускания подвижной траверсы с установившейся скоростью меньше при применении уравновешивающих гидроцилиндров в качестве дополнительных возвратных (см. рис. 2, *а*, *б*). При практически возможных значениях давления $p_{БН}$ в наполнительном баке ми-

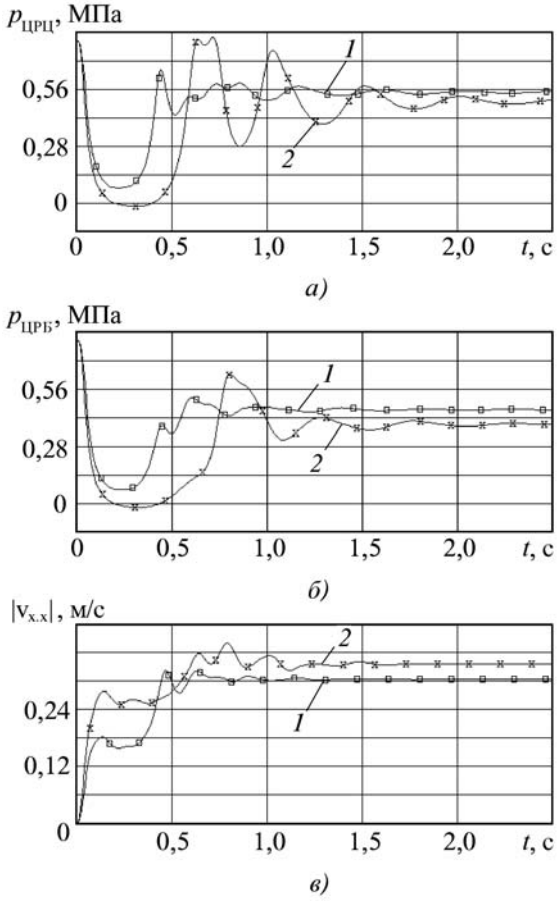


Рис. 2. Графики переходных процессов по давлению в полостях центрального (*а*) и боковых (*б*) рабочих гидроцилиндров и скорости движения подвижной траверсы пресса (*в*) при ее свободном опускании из крайнего верхнего положения при использовании уравновешивающих гидроцилиндров по назначению (*1*) и в качестве дополнительных возвратных (*2*) ($p_{БН}$ = 0,9 МПа, $p_{н.л}$ = 32 МПа, δ_o = 0,04)

нимальное давление $p^{min}_{ЦРЦ}$, $p^{min}_{ЦРБ}$ в полостях рабочих гидроцилиндров (соответственно центрального и боковых) в процессе холостого хода подвижной траверсы (после мгновенного открытия проходного сечения сливного клапана возвратных гидроцилиндров на полную величину) не опускается до уровня упругости насыщенного пара рабочей жидкости даже при наиболее неблагоприятном с этой точки зрения случае, когда свободное опускание подвижной траверсы пресса происходит из ее крайнего верхнего положения (рис. 3, *а*, *б*). Однако минимальное давление оказывается в ряде случаев значительно ниже атмосферного при использовании уравновешивающих гидроцилиндров в качестве дополнительных возвратных.

При использовании гидроцилиндров ЦУ1, ЦУ2 в качестве дополнительных возвратных максимальная сила, создаваемая прессом, возрастает на величину ΔP, которую в первом приближении (без учета изменения сил трения) можно определить по следующей формуле:

$$\Delta P = n_у A_у (p_{н.л} - p_{БН}),$$

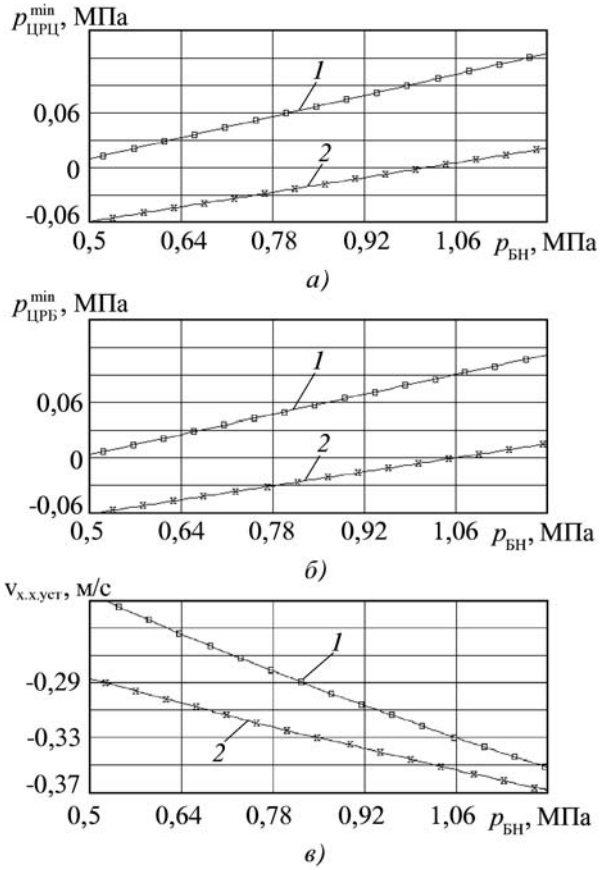


Рис. 3. Зависимости минимального давления в полостях центрального (*а*) и боковых (*б*) рабочих гидроцилиндров и установившейся скорости движения подвижной траверсы пресса (*в*) при ее свободном опускании из крайнего верхнего положения от давления в БН ($p_{н.л}$ = 32 МПа, δ_o = 0,04):
1, 2 – см. рис. 2

где $p_{н.л}$, $p_{БН}$ – давление в начале напорной гидролинии пресса и в наполнительном баке БН соответственно.

Величина ΔP является наиболее значимой при работе пресса на первой ступени силы, когда для осуществления рабочего хода только полость центрального рабочего гидроцилиндра ЦРЦ соединяется с напорной гидролинией пресса (посредством напорного клапана КНЦ), а полости боковых рабочих цилиндров ЦРБ1, ЦРБ2 остаются соединенными с наполнительным баком (посредством сливного КСБ и наполнительного КНПБ клапанов). В связи с этим ниже приведены результаты расчетов только для случая рабочего хода пресса на первой ступени силы.

На рис. 4, *а* приведены зависимости установившейся скорости $v_{р.х.уст}$ движения подвижной траверсы пресса во время рабочего хода от силы сопротивления *R* поковки деформации. Видно, что при подключении уравновешивающих гидроцилиндров к возвратным значение скорости $v_{р.х.уст}$ по абсолютной величине больше, чем при использовании уравновешивающих гидроцилиндров по прямому назначению, и отмеченное отличие возрастает при увеличении *R* (до определенного предела).

Следует отметить, что во время рабочего хода скорость перемещения подвижной траверсы пресса регулируют путем изменения площади проходного сечения напорных клапанов рабочих гидроцилиндров, т.е. изменяя их пропускную способность. При уменьшении силы сопротивления перемещению подвижной траверсы на величину ΔP для поддержания движения траверсы с заданной скоростью $v_{р.х.з}$ уменьшают открытие проходного сечения данных клапанов, что вызывает увеличение потерь механической мощности рабочей жидкости на величину $\Delta P v_{р.х.з}$ и повышенный нагрев жидкости. Таким образом, при рассмотренных условиях увеличение максимальной силы, создаваемой прессом при работе на каждой ступени, путем использования уравновешивающих гидроцилиндров в качестве дополнительных возвратных является нецелесообразным.

Вместе с тем при работе пресса в диапазоне значений сил сопротивления поковки деформации, близких к номинальной силе пресса на соответствующей ступени, применение уравновешивающих гидроцилиндров в качестве дополнительных возвратных расширяет возможности обеспечения движения подвижной траверсы с заданной скоростью $v_{р.х.з}$ или близкой к ней, а также возможности работы пресса на текущей

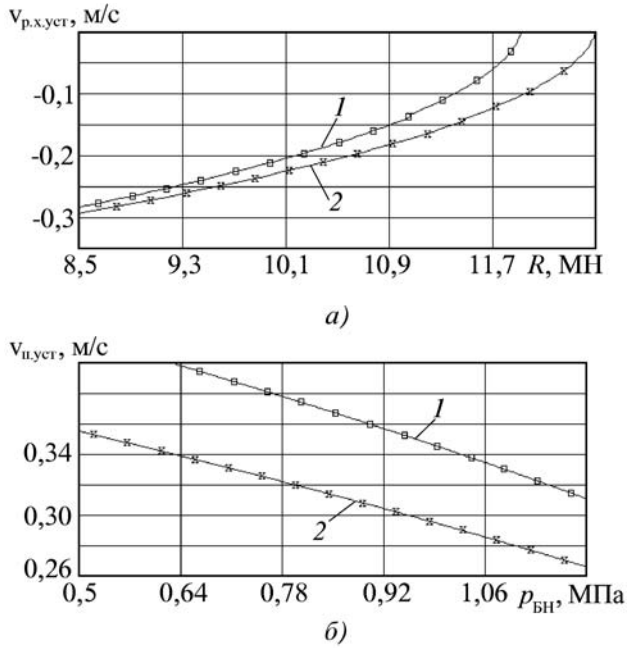


Рис. 4. Зависимости установившейся скорости движения подвижной траверсы пресса во время рабочего хода от силы сопротивления поковки деформации при работе пресса на первой ступени силы ($p_{БН}$ = 0,9 МПа, $p_{н.л}$ = 32 МПа) (*а*) и при подъеме траверсы от давления в БН ($p_{н.л}$ = 32 МПа) (*б*):
1, 2 – см. рис. 2

ступени силы. Последнее обстоятельство существенно, поскольку при фиксированном значении силы сопротивления поковки деформации работа пресса на более высокой ступени силы приводит к значительному увеличению потерь механической мощности на гидравлических сопротивлениях и повышенному нагреву рабочей жидкости.

Необходимо отметить, что при работе пресса в режиме шлихтовки (проглаживания) рабочие полости возвратных гидроцилиндров постоянно соединены с напорной гидролинией пресса посредством напорного клапана КНВ. При этом непосредственное соединение рабочих полостей уравновешивающих гидроцилиндров с напорной гидролинией пресса более предпочтительно по сравнению с вариантом подключения их к полостям возвратных гидроцилиндров, поскольку в последнем случае расход рабочей жидкости через напорный клапан КНВ и, соответственно, потери давления и мощности в нем оказываются повышенными. При работе в режиме шлихтовки (и ни в каком другом случае) проходные сечения обоих запорных клапанов ВН1 и ВН2 могут быть одновременно открыты.

Для подъема (обратного хода) подвижной траверсы рабочие полости возвратных гидроцилиндров соединяются с напорной гидролинией пресса посредством напорного клапана КНВ. Если рабочие полости уравновешивающих гидроцилиндров присоединены к полостям возвратных гидроцилиндров, то в рассматриваемом случае рабочая жидкость поступает во все гидроцилиндры только через проходное сечение клапана КНВ, и приведенное гидравлическое сопротивление гидропривода траверсы оказывается повышенным по сравнению со случаем, когда уравновешивающие гидроцилиндры используют по назначению (постоянно соединены с напорной гидролинией пресса).

В связи с этим установившаяся скорость $v_{п.уст}$ подъема подвижной траверсы при использовании уравновешивающих гидроцилиндров в качестве дополнительных возвратных меньше, чем при использовании их по прямому назначению (рис. 4, *б*). При этом величина этого отличия тем меньше, чем больше пропускная способность клапана КНВ.

Время разгона подвижной траверсы до скорости установившегося движения существенно зависит от начальных условий (в первую очередь от положения траверсы и начального давления в полостях гидроцилиндров привода). В качестве примера на рис. 5 приведены графики переходных процессов для скорости движения подвижной траверсы пресса при ее подъеме с жесткого упора из среднего положения, когда в момент открытия проходного сечения напорного клапана КНВ давление в полостях рабочих ЦРЦ, ЦРБ1, ЦРБ2 и возвратных ЦВ1, ЦВ2 гидроцилиндров определялось давлением в наполнительном баке БН (с учетом разности геометрических высот). Видно, что время разгона подвижной траверсы до соответствующей скорости установившегося движения практически одинаково для обоих рассматриваемых вариантов использования уравновешивающих гидроцилиндров.

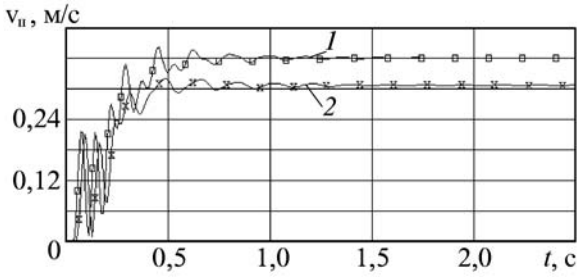


Рис. 5. Графики переходных процессов для скорости движения подвижной траверсы пресса при ее подъеме с жесткого упора из среднего положения ($p_{БН}$ = 0,9 МПа, $p_{н.л}$ = 32 МПа, $\delta_о$ = 0,04): *1, 2* – см. рис. 2

Выводы

1. При наличии в конструкции ковочного пресса уравновешивающих гидроцилиндров их использование в качестве дополнительных возвратных эффективно лишь в случае работы пресса при максимальной силе сопротивления поковки деформации, близкой к номинальной силе пресса на соответствующей ступени.

2. При проектировании новых гидравлических ковочных прессов более целесообразна конструктивная схема пресса с уравновешивающими гидроцилиндрами, которые могут подключаться к возвратным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мюллер Э.** Гидравлические прессы и их приводы. Т. 1. Ковочные прессы / Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1965. 316 с.

2. **Белов А.Ф., Розанов Б.В., Линц В.П.** Объемная штамповка на гидравлических прессах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.

3. **Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М.** Выбор значений коэффициентов обратной связи электрогидравлической системы управления подвижной траверсой штамповочного пресса на этапе проектирования // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 3. С. 22–30.

4. **Бажин И.И., Беренгард Ю.Г., Гайцгори М.М. и др.** Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / под общ. ред. С.А. Ермакова. М.: Машиностроение, 1988. 312 с.

5. **Гойдо М.Е.** Теория и проектирование гидроприводов: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. 255 с.

Максим Ефимович Гойдо, канд. техн. наук;
Валерий Владимирович Бодров, канд. техн. наук;
Рамиль Мерсеитович Багаутдинов,
генеральный директор

УДК 621.983.3

П.В. Сёмин, В.А. Сёмин *(Московский государственный институт стали и сплавов)*

Определение площади пятна контакта ролика с заготовкой при горячей раскатке дисков из титановых сплавов

Представлена методика определения площади пятна контакта ролика и заготовки с использованием системы твердотельного моделирования SolidWorks. Данная методика была опробована при определении площади пятна контакта ролика с заготовкой, у которой высота обода больше высоты ступицы. Методика применима для определения площади пятна контакта при взаимодействии роликов и заготовок из различных сплавов с произвольной геометрией.

Definition technique of the contact patch area of roller and blank use of solid-state modelling SolidWorks system is presented. The given technique has been tested upon definition of the contact patch area of roller with blank at which the rim height is more than nave height. However technique is applicable for definition of the contact patch area at interaction of rollers and blanks made of various alloys with any geometry.

Ключевые слова: контакт; ролик; заготовка; диск; раскатка; титановые сплавы; инструмент; вычисления; пиноли.

Key words: contact; roller; blank; disk; rolling; titanium alloys; tool; calculation; poppet sleeves.

При проектировании процесса раскатки дисков крайне важно знать площадь пятна контакта ролика с заготовкой и траекторию движения роликов, так как эти величины позволяют вычислить силу раскатки и грубо спроектировать весь процесс раскатки дисков [1]. Траектория движения роликов определяется геометрией диска, а вот как деформировать заготовку на этой траектории – зависит от контактного взаимодействия инструмента и заготовки.

Площадь пятна контакта ролика с заготовкой представляет собой объемную поверхность, существенно меняющуюся в зависимости от направления и времени раскатки.

Рассмотрим методику расчета площади пятна контакта ролика с заготовкой при раскатке диска в осевом направлении. Пусть ролик внедряется в полотно заготовки в осевом направлении на глубину Δh_5 (рис. 1), последовательно углубляясь в тело заготовки на Δh_1, Δh_2, Δh_3, Δh_4, Δh_5. Горизонтальная поверхность полотна диска S по мере внедрения ролика фиксирует площадь пересечения ролика с поверхностью диска в виде сечений соответственно S_1–S_5.

Рис. 1. Схема для определения площади пятна контакта при раскатке в осевом направлении

Методика определения площади пятна контакта имеет следующую схему.

1. Путь ролика в осевом направлении разбивается на необходимое количество частей, каждая из которых соответствует глубине внедрения Δh_1–Δh_5 ролика в заготовку (табл. 1, рис. 1).

2. Для определения площади пятна контакта используется система твердотельного моделирования SolidWorks. Для этого плоскую поверхность ролика переводят в трехмерный вид. Площадь пятна контакта представляет собой сложную объемную поверхность,

1. Перемещение ролика при раскатке в осевом направлении

Номер участка	Внедрение ролика	Перемещение ролика, мм	Секущая плоскость
1	Δh_1	0,5	S_1
2	Δh_2	1,0	S_2
3	Δh_3	2,2	S_3
4	Δh_4	3,6	S_4
5	Δh_5	5,0	S_5

2. Изменение площади пятна контакта при раскатке диска в осевом направлении

Номер участка	Перемещение ролика, мм	Профильная проекция пятна контакта	Площадь пятна контакта (вид сверху)
1	0,5		
2	1,0		
3	2,2		
4	3,6		
5	4,55		

изменяющуюся по мере внедрения ролика в заготовку (табл. 2).

Методика расчета площади пятна контакта ролика с заготовкой при раскатке в радиальном направлении существенно отличается от определения площади пятна контакта в осевом направлении.

Площадь пятна контакта при раскатке в радиальном направлении определяется по следующей схеме.

1. Перемещение ролика из точки 0 в точку 5 разбивается на участки l_1–l_5 (рис. 2, табл. 3).

2. Вертикальные секущие плоскости S_1–S_5 соответствуют перемещениям ролика по радиусам l_1–l_5, а горизонтальные секущие плоскости K_1–K_5 определяют пересечение поверхности заготовки с роликом и, следовательно, определяют поверхность пятна контакта ролика с поверхностью. По мере продвижения ролика в радиальном направлении площадь пятна контакта с заготовкой увеличивается или уменьшается в зависимости от траектории раскатки и геометрии исходной заготовки (высота профиля заготовки меняется от h_1 до h_5).

Для определения площади пятна контакта с помощью SolidWorks поверхность ролика, усеченную плоскостями, переводят в трехмерный вид и вычисляют поверхность, являющуюся площадью пятна контакта.

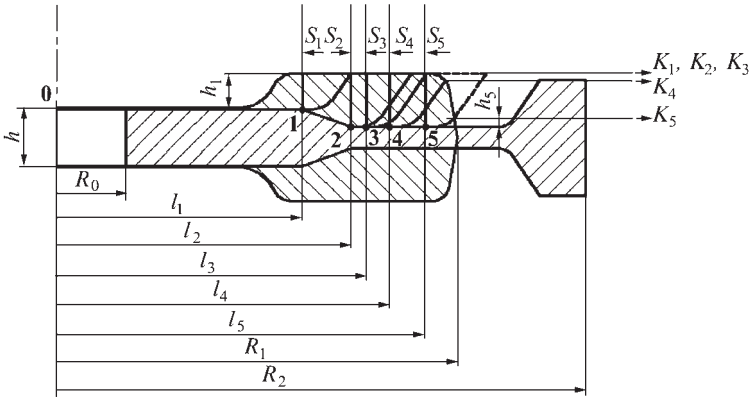


Рис. 2. Схема для определения площади пятна контакта при раскатке в радиальном направлении

3. Перемещение ролика при раскатке в радиальном направлении

Номер участка	Радиус движения ролика	Перемещение ролика, мм	Секущая плоскость	
			Горизонтальная	Вертикальная
1	l_1	8	K_1	S_1
2	l_2	52	K_2	S_2
3	l_3	60	K_3	S_3
4	l_4	72	K_4	S_4
5	l_5	82	K_5	S_5

4. Изменение площади пятна контакта при раскатке в радиальном направлении, угол среднего конуса ролика 55°

Номер участка	Перемещение ролика, мм	Профильная проекция пятна контакта	Площадь пятна контакта, вид сверху
1	8,2		
2	52,0		
3	59,7		
4	71,6		
5	81,8		

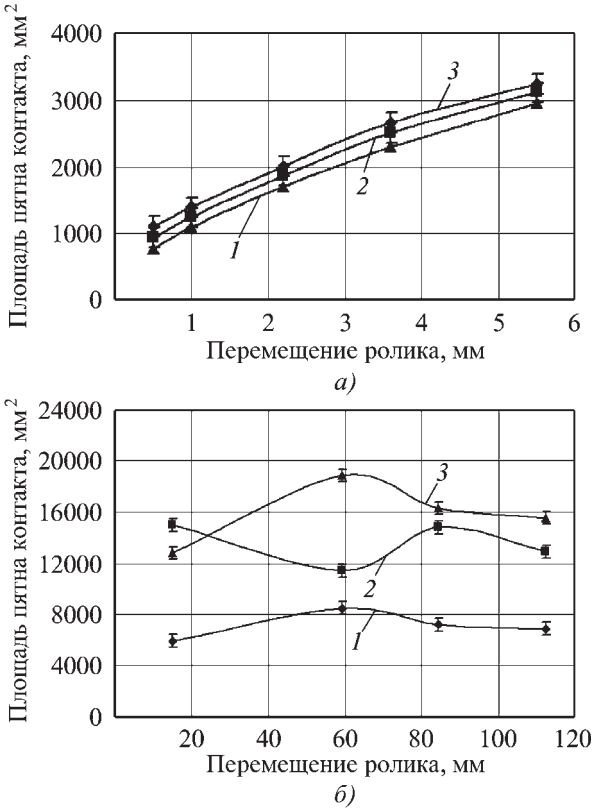


Рис. 3. Изменение площади пятна контакта ролика с заготовкой при раскатке:
а – в осевом направлении; *б* – в радиальном направлении. Угол наклона рабочей части роликов: *1* – 55°; *2* – 45°; *3* – 30°

Предложенная методика позволяет определить площадь пятна контакта ролика с заготовкой приближенно, так как не учитывает формоизменение заготовки.

Изменение площади пятна контакта ролика с заготовкой при раскатке в радиальном направлении изображено в табл. 4.

Количественное изменение площади пятна контакта ролика с заготовкой при раскатке в осевом и радиальном направлениях представлено на рис. 3. При этом использовалась геометрия рабочих роликов с углами наклона 55, 45, 30° к оси ролика (рис. 4). Угол наклона ролика к заготовке φ обычно составляет 10...30°, а угол наклона рабочей части ролика α – 30...55°.

Современные средства обработки результатов позволяют представить площадь пятна контакта роликов Y в зависимости от перемещения роликов в осевом направлении заготовки X в виде уравнения

$$Y = -2{,}7317X^3 + 0{,}4591X^2 + 321{,}32X + 164{,}22.$$

Аналогичная зависимость может быть представлена и для радиальной раскатки дисков.

Интерес представляет сравнение результатов, полученных по предлагаемой методике и рассчитанных с помощью объемной конечно-элементной системы DEFORM 3D. Результаты таких исследований представлены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что предложенная методика определения пятна контакта ролика и раскатываемой заготовки качественно совпадает с расчетами, но численные результаты несколько отличаются. Однако в обоих случаях имеются экстремальные значения площади контакта, при этом появление их совпадает по

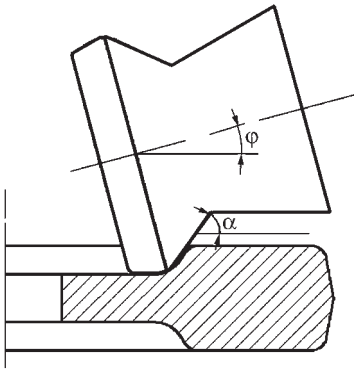


Рис. 4. Конструкция ролика для раскатки дисков

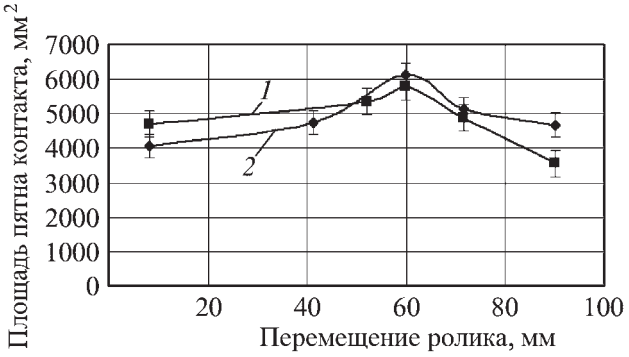


Рис. 5. Изменение площади пятна контакта ролика с заготовкой при раскатке в радиальном направлении (угол наклона рабочей части ролика 55°):
1 – без учета формоизменения; *2* – с учетом формоизменения

координате при раскатке. Последнее говорит о том, что предлагаемая методика может быть использована при предварительном проектировании процесса раскатки дисков без достаточно громоздких и трудоемких расчетов в конечно-элементных системах. Кроме того, выявление экстремального участка говорит о том, что именно с этой координаты при раскатке начинается выпучивание металла, сопровождающееся повышением силы и температуры (критическая точка раскатки).

Вывод

Методика определения площади пятна контакта инструмента и заготовки при раскатке, предложенная в работе, качественно совпадает с расчетной. Получаемые поверхности контакта могут быть представлены в виде аналитических зависимостей. Использование данных разработок позволяет выявить критические участки и заранее предусмотреть мероприятия по устранению брака при раскатке. Более того, используя методику определения поверхности пятна контакта можно существенно сократить расходы на проектирование процесса раскатки, а также расходы на математическое моделирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З.** Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка трудноформируемых материалов. М.: Наука, 2002. 438 с.

Петр Владимирович Сёмин, инженер;
Владимир Алексеевич Сёмин, канд. техн. наук

УДК 621.981

С.В. Филимонов *(ООО "НПО "ИДМ", г. Ульяновск),* **А.В. Филимонов** *(УлГТУ),*
В.И. Филимонов *(ОАО "Ульяновский Механический Завод")*

Конструктивная технологичность гнутых профилей и узлов на их основе

Рассмотрены вопросы учета конструктивной технологичности при проектировании гнутых профилей. Приведены рекомендации по проектированию узлов, включающих в себя такие профили.

There are considered some issues relating to accounting of structural manufacturability in roll-formed profiles designing. Some recommendations covering the design of assemblies with roll-formed profiles are given.

Ключевые слова: гнутый профиль; технологичность.

Key words: roll-formed profile; manufacturability.

На стадии разработки конструкции изделий, включающих гнутые профили, перед конструктором возникает ряд вопросов, требующих определенных знаний по расчету и применению тонкостенных конструкций, а также технологических возможностей производства гнутых профилей.

Наиболее общие сведения по технологичности конструкций изложены в работе [1], однако для практических целей в конкретной области, в частности, в сфере сборных конструкций из тонкостенных гнутых профилей проката требуются конкретные сведения и рекомендации. Данная публикация отчасти восполняет этот пробел.

В последнее десятилетие получил широкое распространение метод интенсивного деформирования, применяемый для производства многоэлементных гнутых профилей и обладающий рядом преимуществ перед традиционным профилированием [2]. Учет новых возможностей технологии также оказывает существенное влияние на процесс конструирования гнутых профилей и выбор материала.

На рис. 1 приведены основные факторы, подлежащие учету при разработке конструкций с применением гнутых профилей. По функциональному назначению профили могут быть условно разделены на силовые, соединительные, вспомогательные и декоратив-

Рис. 1. Факторы, подлежащие учету при разработке конструкций с применением гнутых профилей

ные. Часто один и тот же профиль может совмещать ряд функциональных предназначений. Например, силовой профиль конструкции фасада здания или мансардной постройки должен удовлетворять требованиям технической эстетики, выполняя тем самым и функцию декоративного элемента.

Силовые элементы конструкции могут работать на сжатие-растяжение, изгиб, кручение или же испытывать комбинированное нагружение. В зависимости от вида нагружения и значений нагрузки при разработке конструкции профиля проводят соответствующий проектировочный расчет по допускаемым напряжениям или допускаемым нагрузкам. Однако сложность определения расчетным путем разрушающих нагрузок существенно ограничивает применение второго подхода.

Расчетные формулы для различных видов нагружения при проектировании профиля сведены в табл. 1. Если профиль подвержен нескольким видам нагрузок, то в первом приближении размеры сечения могут определяться на основе отбора максимальных расчетных значений размеров элементов профиля из совокупности полученных расчетных данных.

Для уточненного расчета сечения профиля при комбинированном нагружении следует обращаться к работам [3, 4]. В ряде случаев форма профиля и условия закрепления концов профильной балки предопределены требованиями к эксплуатации и монтажу профиля в конструкции.

Профиль может выполнять функцию соединительного элемента – неподвижного (раскосы, соединители, перемычки) или подвижного (тяги). В этом случае проектировочный и поверочный расчеты существенно упрощаются. Специальных расчетов, связанных с нагружением, в ряде случаев можно избежать при проектировании вспомогательных элементов (ограждений, направляющих, уплотнителей), а также декоративных элементов (панелей и планок).

Уточненные расчеты могут не потребоваться и в случае изготовления единичных изделий, в то время как для массового производства деталей и узлов ответственного назначения, кроме проектировочных расчетов, желательно выполнить конечно-элементный и функционально-стоимостной анализы конструкций.

На выбор формы сечения профиля существенно влияют условия компоновки узла, взаимозаменяемости и ремонтопригодности. Часто выбор формы сечения профиля связан с типовым набором фитинговых элементов (выпускаемых серийно) с учетом возможной замены профиля после прекращения его производства другим, имеющим сходные характеристики несущей способности. Это вызвано частой сменой номенклатуры производимых профилей в условиях современного рынка профильной продукции [2]. Однако определяющим фактором при выборе формы сечения профиля являются условия эксплуатации, в частности, условия нагружения.

Толщину стенок профиля и размеры элементов его сечения обычно получают в результате проектировочных расчетов. Выбор материала профиля определяется не только ценой и прочностными свойствами материала, но и внешними условиями эксплуатации изде-

1. Расчетные формулы для различных видов нагружения при проектировании профиля

Вид нагружения	Расчетные зависимости	Примечание
Растяжение	$A \geq \frac{N}{[\sigma]}$	$\frac{\mu l}{i} > \lambda_0$
Продольный изгиб (сжатие)	$\frac{\pi^2 E J_{\max}}{(\mu l)^2} \leq P_{cr}$	
Поперечный изгиб	$\frac{M_и^{\max} h_{\max}}{J_m} \leq [\sigma]$	
Кручение	$\frac{3M_к}{s_0 \sum_{i=1}^{n} b_i} \leq [\tau]$	

Обозначения: A – площадь сечения стенок профиля; N – растягивающая сила; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение; E – модуль Юнга; $J_{\max}$ – максимальный момент инерции сечения профиля; μ – коэффициент закрепления концов профильной балки; l – длина профильной балки; P_{cr} – критическая продольная сила сжатия балки; $M_и^{\max}$ – максимальный изгибающий момент; $h_{\max}$ – максимальная высота сечения профиля; J_m – момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба и проходящей через центр тяжести сечения профиля; $M_к$ – крутящий момент; s_0 – толщина стенок профиля; b_i – длина i-го элемента профиля по сечению; n – число элементов сечения профиля; $[\tau]$ – допускаемое касательное напряжение.

лия (температурой, влажностью, ветровой нагрузкой и т.п.).

В последние годы в строительной индустрии все чаще применяют профили, изготовляемые из материалов с покрытием [5]. Такие профили обладают достаточно высокой коррозионной стойкостью, однако в большинстве случаев пригодны лишь для образования разъемных соединений. С одной стороны, это повышает ремонтопригодность конструкции и облегчает сборку, а с другой – может накладывать ограничения в части удовлетворения условиям функциональности (при необходимости жесткой заделки концов или работы при низких или высоких температурах) и сборки (например, невозможности применения сварки).

При разработке конструкции профиля следует также учитывать ограничения, следующие из требований технологичности производства гнутых профилей, которые достаточно обстоятельно описаны в работе [6]. Это касается минимальных радиусов изгиба, ограничений на размеры периферийных элементов, размеры и топологию отверстий (при их наличии), виды покрытий и т.д. В обобщенном виде изложенный подход к проектированию гнутого профиля может быть представлен в виде укрупненного алгоритма (рис. 2).

В конструкциях гнутые профили соединяются друг с другом или же с другими деталями, образуя разъемное (болтовое, винтовое) или неразъемное соединение (заклепочное, сварное, клеевое). Среди неразъемных соединений различают наращивание (увеличение длины), переход (наращивание в целях изменения

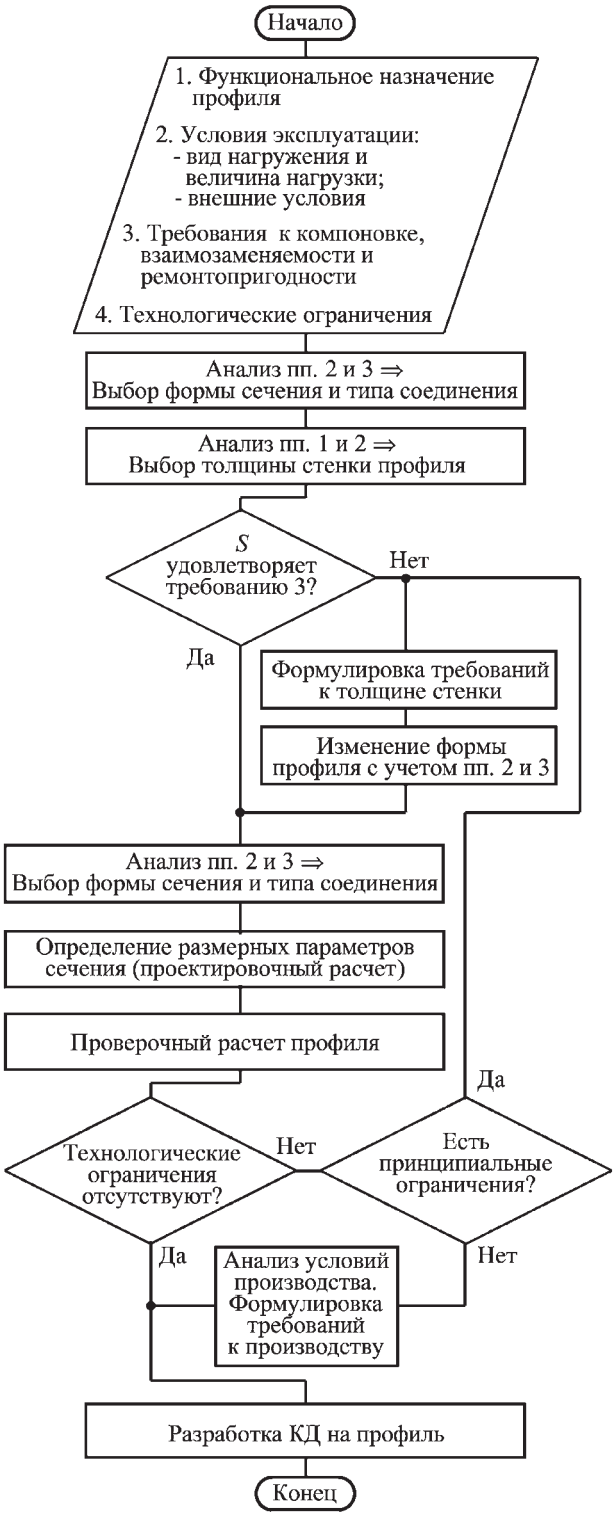
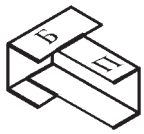
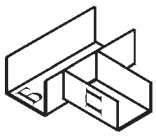
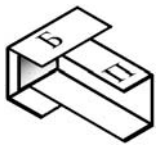
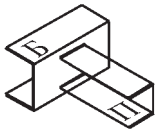
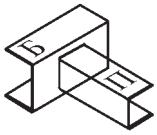
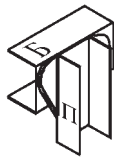
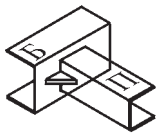
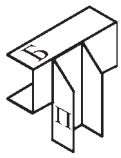
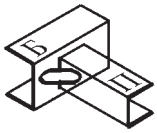
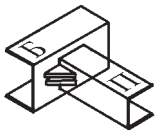
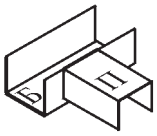
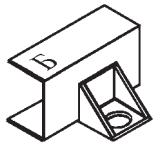


Рис. 2. Укрупненная блок-схема разработки конструкции гнутого профиля

2. Соединение двух профилей открытого сечения в узел

№ п/п	Описание соединения	Схема	№ п/п	Описание соединения	Схема
1	Дно балки – торец профиля со сваркой по периметру контакта		9	Полка балки – торец профиля (раскрыв – стенка)	
2	Дно балки – торец профиля с усилением торца профиля пластиной		10	Стенка балки – торцы полок профиля	
3	Стенка балки – торец профиля со сваркой по периметру контакта		11	Стенка балки – стенка профиля	
4	Стенка балки – торец профиля со сваркой только по стенкам		12	Стенка балки – стенка профиля через косынку	
5	Стенка балки – торец профиля с усилением косынкой по стенкам		13	Стенка балки – стенка профиля со срезом полок профиля на "ус"	
6	Стенка балки – торец профиля с усилением трубчатым элементом по стенкам		14	Соединение "врезанием" и сварка балки и профиля	
7	Стенка балки – торец профиля с усилением косынками полок сваркой со стенками		15	Стенка балки – стенка профиля с подкреплением полок профиля ребрами жесткости	
8	Полка балки – торец профиля (раскрыв в раскрыв)		16	Балка рамы автомобиля – башмак рессоры	

площади сечения в связи с изменением действующей нагрузки), усиление (присоединение дополнительных элементов жесткости), узел (соединение нескольких профильных элементов) [7, 8].

В авиационной промышленности широко применяются заклепочные соединения, а в других отраслях – болтовые (в основном для профилей с покрытием) и сварные соединения (для профилей без покрытия). В табл. 2 приведены примеры соединения гнутых профилей сваркой для иллюстрации выбора целесообразных конструкций. На рис. 3 представлены некоторые конструкции, выполненные из гнутых профилей, изготовленных методом интенсивного деформирования [6].

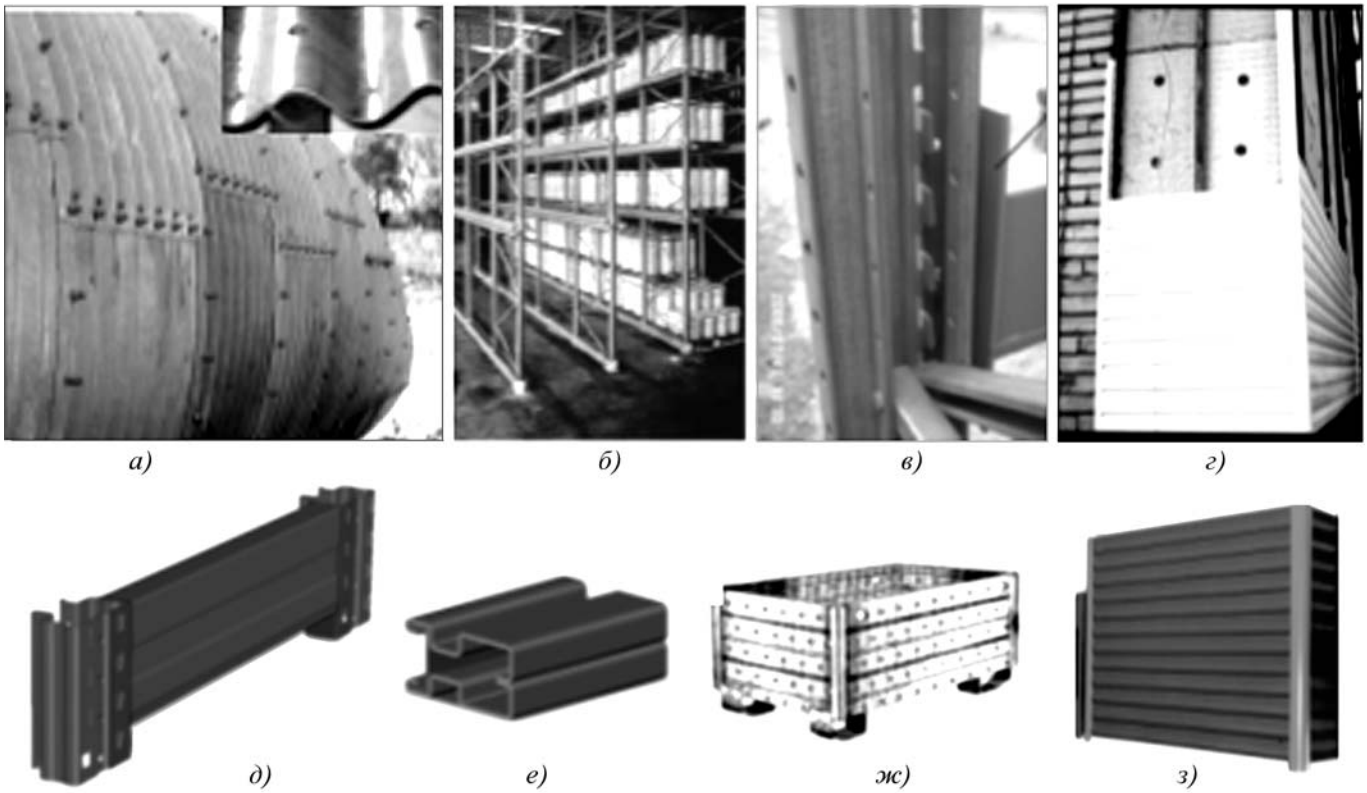


Рис. 3. Примеры конструкций из гнутых профилей, изготовляемых методом интенсивного деформирования:
а – трубы больших диаметров для водотоков; *б* – сборно-разборный стеллаж; *в* – сборочный узел на основе профиля "стойка"; *г* – облицовочные панели; *д* – стеллажные полки; *е* – строительный профиль; *ж* – производственная тара; *з* – облицовка для внутренних помещений

При эксплуатации изделия в местах стыка (заделки) концевых участков профиля (торцевая заделка одного из профилей) обычно возникает концентрация напряжений от рабочей нагрузки, которая суммируется с концентрацией монтажных напряжений (схемы 1, 2 и 14 табл. 2). При статическом нагружении это не приводит к опасным явлениям, а при динамическом вызывает усталостное разрушение металла.

Причиной концентрации напряжений является резкое изменение поперечного сечения детали. Кроме того, при жесткой заделке профиля, работающего на кручение, возможна локальная потеря устойчивости в форме депланации и излома периферийных элементов из-за "стесненного" кручения.

Снижение концентрации напряжений может быть достигнуто за счет обеспечения податливости соединения или же выравнивания жесткости соединяемых элементов (схемы 3 и 4 табл. 2). Для устранения "стесненного" кручения заделка должна осуществляться по наиболее жестким элементам сечения профиля, а периферийные элементы должны быть свободными (схемы 4–7 табл. 2).

Не рекомендуется использовать перемычки периферийных элементов, поскольку отсутствие депланаций приводит к той же схеме "стесненного" кручения, вызывающей концентрацию напряжений в местах заделки профиля. Лучший результат достигается применением пластинчатых перемычек боковых полок при их расположении с одного торца профиля на высоте (0,50...0,75)H со смыканием с дном профиля при движении к другому торцу.

Если рабочая нагрузка носит случайный характер (например, узлы сельскохозяйственных машин), то оптимизация конструкции достигается за счет податливости соединений, а систематические нагрузки, вызывающие концентрацию напряжений, уменьшают за счет подрессоривания (амортизации).

При перекрестном соединении профилей (схемы 10 и 11 табл. 2) условия работы профиля на изгиб и кручение при динамической нагрузке несколько улучшаются по сравнению с соединением в торец на уровне дна профиля. Свободные полки основного профиля (балки) смягчают условия жесткой заделки.

В некоторых случаях может потребоваться усиление соединения, что может достигаться за счет косынок, которые обычно крепят к наиболее жестким элементам сечения (схема 12 табл. 2). При использовании нескольких косынок их не следует разносить на расстояние, превышающее одну треть высоты профиля (схема 7 табл. 2). При крутильной форме нагружения целесообразно использовать замкнутый профиль, поскольку его жесткость на кручение более чем в 50 раз

превышает жесткость открытого профиля той же массы.

Снижению концентраций напряжений профиля, работающего на кручение, способствует также срез его концевых участков на "ус" (схема 13 табл. 2). Для профилей, работающих на изгиб, иногда целесообразно подкрепление их полок элементами жесткости (схема 15 табл. 2). Крепежные элементы, типа башмаков рессор автомобиля, следует крепить к нижней стороне стенки балки (рамы) (схема 16 табл. 2).

В случае статических нагрузок при конструктивной необходимости возможно также соединение торца профиля с полкой балки (схемы 8 и 9 табл. 2). Однако с точки зрения работы узла они не принадлежат к числу оптимальных.

При использовании фитингов для сборки конструкции надо следить за тем, чтобы металлы профиля и фитинга (или крепежного элемента) не образовывали анодные пары.

При разработке конструкций, подлежащих эксплуатации на открытом воздухе или в помещениях с повышенной влажностью, следует руководствоваться следующими рекомендациями:

1) открытую сторону профиля следует располагать снизу;

2) в необходимых случаях предусматривать выпуклости элементов или их наклон для отвода влаги;

3) в обоснованных случаях надлежит предусматривать отверстия для дренажа воды;

4) во избежание капиллярного просачивания швы соединений следует герметизировать (или окрашивать);

5) места концентрации напряжений подлежат усилению во избежание повышенной коррозии;

6) профили без покрытия или оцинкованные профили подлежат покраске;

7) торцы и кромки профилей с покрытием подлежат защите от коррозии окрашиванием.

Выводы

1. При проектировании вновь создаваемых конструкций гнутых профилей надлежит учитывать функциональное назначение профиля, условия компоновки, взаимозаменяемости и ремонтопригодности, условия эксплуатации, а также технологические ограничения производства гнутых профилей.

2. При создании узлов, включающих гнутые профили, следует учитывать внешние факторы эксплуатации таких узлов, минимизируя концентрации напряжений от рабочих нагрузок выбором рациональной конструкции и предусматривая их антикоррозийную защиту.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Технологичность** конструкции изделия: справочник / под ред. Ю.Д. Амирова. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.

2. **Филимонов С.В., Филимонов В.И.** Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры. Ульяновск: Изд-во УлГТУ "Венец", 2004. 246 с.

3. **Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.** Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

4. **Гиммельфарб А.Л.** Основы конструирования в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1980. 367 с.

5. **Илюшкин М.В., Филимонов В.И.** Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. 200 с.

6. **Филимонов С.В., Филимонов В.И.** Интенсивное формообразование гнутых профилей. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2008. 444 с.

7. **Давыдов В.И.** Изделия из тонкостенных профилей. М.: Машиностроение, 1957. 186 с.

8. **Тришевский И.С., Марьин В.С., Хмель В.А.** Производство деталей из гнутых профилей. Киев: Техника, 1985. 128 с.

Сергей Вячеславович Филимонов, канд. техн. наук, генеральный директор;
Андрей Вячеславович Филимонов, инженер;
Вячеслав Иванович Филимонов, д-р техн. наук

УДК 620.193; 669.715

Ю.А. Пучков, Ш.Х. Нгуен, Ван Яньлун, С.Л. Березина, Л.А. Седова *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Исследование напряженного состояния и коррозионной стойкости пресс-форм из алюминиевых сплавов

Исследовано влияние эксплуатационных факторов – давления внутри пресс-форм и их температуры – на напряженное состояние алюминиевых пресс-форм, применяемых при производстве изделий из вспенивающихся пластмасс, а также влияние водородного показателя и концентрации поваренной соли в технологической воде, используемой для нагрева и охлаждения пресс-форм, на коррозионную стойкость алюминиевых сплавов. Напряженное состояние пресс-форм исследовано расчетным методом, коррозионная стойкость – потенциодинамическим.

The influence of operation factors – pressure inside the moulds and their temperature is investigated on the stress state of the moulds made from aluminum alloys. These moulds are applied for the manufacture of articles from foaming plastics. The influence of the hydrogen ion exponent and the concentration of sodium chloride in the technological water used for heating and cooling of the moulds is investigated on the corrosion resistance of the aluminum alloys, perspective for mould manufacture too. The stress state of the moulds is investigated by calculated method. Potentiodynamic studies were used to determine the corrosion resistance of the aluminum alloys.

Ключевые слова: алюминиевые формы; коррозионная стойкость; алюминиевые сплавы; вспенивающиеся пластмассы.

Key words: aluminum moulds; corrosion resistance; aluminum alloys; foaming plastics.

Пресс-формы из алюминиевых сплавов применяют для получения из вспенивающихся пластмасс элементов тепло- и звукоизоляции, моделей для литья, упаковок и т.д. Теплопроводность алюминиевых сплавов выше теплопроводности сталей, что позволяет при замене сталей на алюминиевые сплавы сократить продолжительность нагрева паром и охлаждения водой пресс-формы и в несколько раз снизить продолжительность формовки изделий. Благодаря низким затратам на обработку резанием и термообработку, затраты на изготовление алюминиевых пресс-форм ниже, чем стальных. Продолжительность эксплуатации пресс-форм из алюминиевых сплавов в основном ограничена их недостаточно высокой коррозионной стойкостью. Причиной выхода из строя пресс-форм является развитие в поверхностной зоне язвенной коррозии и коррозионной усталости [1, 2].

Методика проведения исследований. Исследовали деформируемые алюминиевые сплавы (табл. 1), прошедшие обычную термическую обработку, рассчитанную на повышение коррозионной стойкости:

– АД31Т: закалка с 510...535 °С в воду; естественное старение;

– В91Т3: закалка с 465 °С в воду; старение 100 °С, 6 ч + 170 °С, 6 ч.

Анализ напряженного состояния пресс-форм выполнен с помощью программного комплекса ANSYS.

Металлографическое исследование сплавов и покрытий проведено на микроскопе "Неофот 21" при увеличении в 100–1000 раз с использованием системы цифровой обработки изображений. Для металлографического травления использовали реактив: HF (0,5 мл) + + HCl (1,5 мл) + HNO_3 (2,5 мл) + H_2O (95 мл).

Микрорентгеноспектральное исследование проведено на приборе "Camscan 4D", оснащенном энергодисперсионным анализатором "Inca 86".

Коррозионную стойкость покрытий исследовали с помощью потенциостата П5827М в воде с 0,01; 0,02; 0,04 г/л NaCl и воде с водородным показателем 4,0; 6,5; 8,0 и 10,0 путем построения и обработки анодных поляризационных кривых, полученных при скорости развертки 10 мВ/мин. При измерении pH ионометром ЭВ-74 в качестве контрольных использовали стандартные буферные растворы. Скорость коррозии рассчитывали с использованием уравнения Тафеля, закона Фарадея и программного обеспечения, разрабо-

1. Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов для пресс-форм

Сплав	Содержание элементов, % мас.						
	легирующих					примесных	
	Cu	Mg	Mn	Zn	Cr	Si	Fe
АД31Т (1310)	0,1	0,45...0,9	0,1	0,2	0,1	0,2...0,6	–
В91Т3 (1913)	0,3...1,0	1,6...2,0	0,2...0,5	3,7...4,5	0,1...0,25	0,3	0,5

2. Механические и физические характеристики сплавов АД31Т и В91Т3

Сплав	$\alpha \cdot 10^6$, °C^{-1}	λ, Вт/(м·°С)	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	σ_{-1}	*E*, ГПа	δ, %
			МПа				
АД31Т	23,6	170	270	186	70	71	20
В91Т3	23,9	159	450	–	100	71	15

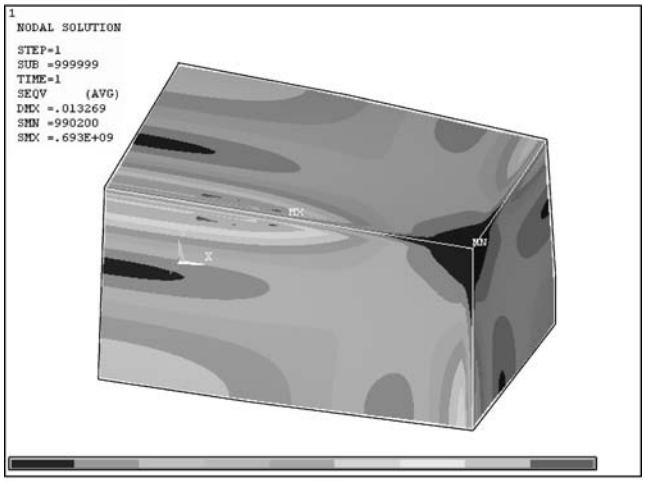
танного на кафедре "Материаловедение" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Результаты исследования и обсуждение. Расчеты выполнены для пресс-форм в виде прямоугольного параллелепипеда размером 500×300×300 мм с толщиной стенки δ = 5; 15; 20; 25 мм, заполненной пенополистиролом, создающим внутри пресс-форм давление *p* = 0,6 МПа при температуре *t* = 75 °С. Механические и физические характеристики сплавов при температуре 75 °С приведены в табл. 2.

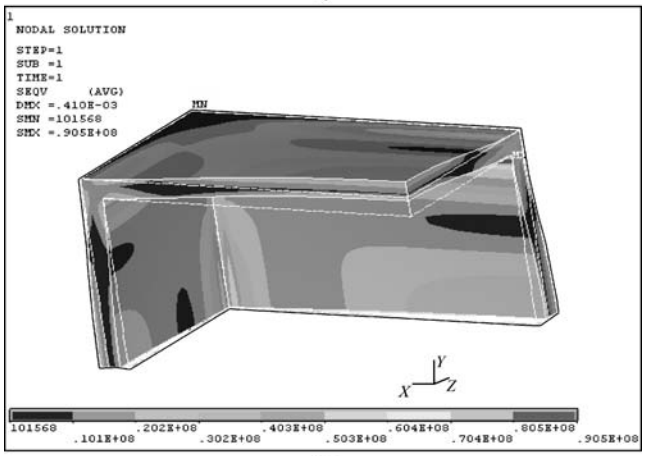
С учетом симметричности модели результаты расчета приведены для 1/8 части (рис. 1). Как во внешних, так и во внутренних слоях пресс-форм напряжения имеют растягивающий характер. Расчетные величины напряжений в поверхностных слоях пресс-форм из сплавов АД31Т и В91Т3 не отличаются, так как эти сплавы имеют одинаковые значения модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Наибольшие растягивающие напряжения σ = smx наблюдаются вблизи середины ребер пресс-формы. В центрах граней (500×300 мм) пресс-формы напряжения имеют также экстремальное значение, однако по величине меньше smx. Минимальные напряжения наблюдаются в углах пресс-формы. При толщине стенки δ = 5 мм максимальные расчетные напряжения превышают временное сопротивление $\sigma_в$ сплавов АД31Т и В91Т3. Максимальное перемещение наблюдается в центре большой грани.

В пресс-форме с толщиной стенки δ = 15 мм расчетные значения напряжения ниже предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплавов АД31Т и В91Т3, но выше их пределов выносливости σ_{-1}. Напряжения в поверхностных слоях выше напряжений в центре стенок. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 2, 3. При увеличении толщины стенки пресс-формы от 15 до 25 мм перемещение центра большой грани уменьшается приблизительно в 5 раз (от 0,37 до 0,075 мм).



а)



б)

Рис. 1. Распределение напряжений в пресс-форме в виде прямоугольного параллелепипеда 500×300×300 мм из сплавов АД31Т и В91Т3 при *t* = 75 °С и давлении внутри пресс-формы *p* = 0,6 МПа:

а – δ = 5 мм; *б* – δ = 15 мм

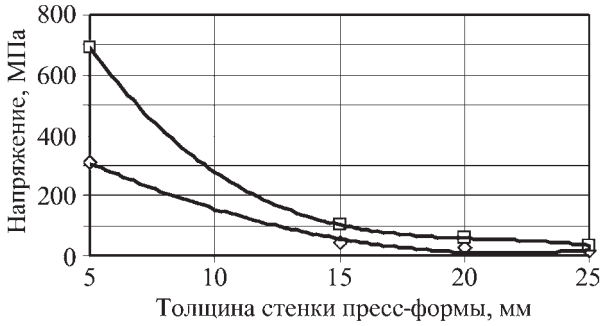


Рис. 2. Зависимость экстремальных напряжений на поверхности пресс-формы от толщины ее стенки:
□ – центр длинных ребер; ◇ – центр больших граней

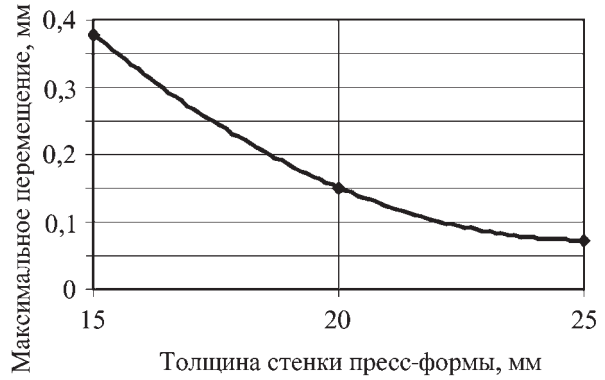


Рис. 3. Зависимость перемещения центра большой грани от толщины стенки пресс-формы

Коррозионные исследования, выполненные потенциодинамическим методом, показали, что увеличение в воде концентрации NaCl от 0,01 до 0,04 г/л повышает скорость коррозии в 6–8 раз (рис. 4, *а*). При этом наблюдается снижение потенциала транспассивации $E_{тп}$, потенциала коррозии $E_{кор}$ и их разности $E_{тп} - E_{кор}$.

На скорость коррозии сильное влияние оказывает также водородный показатель среды. Наиболее низкая скорость коррозии наблюдается в воде с 6,5 < pH < < 7,5 (рис. 4, *б*). При увеличении pH от 6,5 до 10 скорость коррозии увеличивается в 8–15 раз, при этом наблюдается заметное снижение потенциала коррозии. При понижении pH от 6,5 до 4 скорость коррозии увеличивается в 3,5–6 раз. Коррозия сплавов АД31Т и В91Т3 начинается с образования на их поверхности питтингов. На рис. 5 приведены микроструктуры сплавов после выдержки в коррозионно-активной среде.

В щелочной и хлорсодержащей воде на поверхности сплава В91Т3 питтинг преимущественно развивается вблизи включений $Al_6FeCuZn$; на поверхности сплава АД31Т – вблизи включений AlSiFe. Питтинг в этих

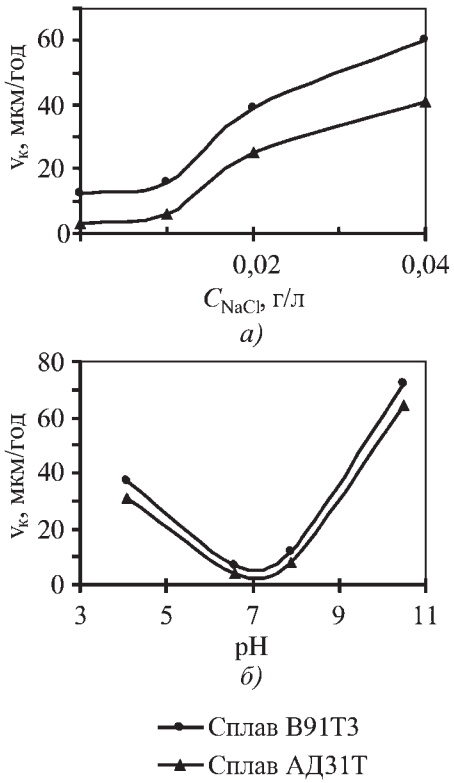


Рис. 4. Влияние концентрации поваренной соли C_{NaCl} (*а*) и pH среды (*б*) на скорость коррозии сплавов АД31Т и В91Т3

сплавах преимущественно развивается вблизи крупных некогерентных катодных включений. Размер катодных включений и склонность к питтинговой коррозии в сплаве АД31Т больше, чем в сплаве В91Т3, несмотря на то, что сплав В91Т3 уступает по общим коррозионным потерям сплаву АД31Т (см. рис. 4).

Питтинги являются концентраторами коррозии, приводящими при наличии циклически изменяющихся растягивающих напряжений к развитию коррозионной усталости на внешней поверхности пресс-форм (рис. 6).

Значительно отличаясь по временному сопротивлению и пределу выносливости при испытании на

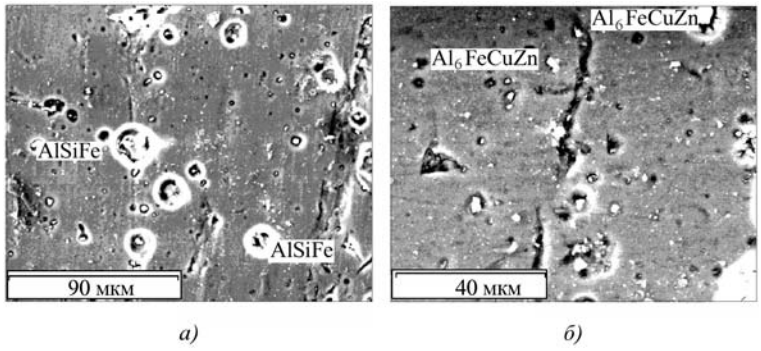


Рис. 5. Развитие питтинга на поверхности сплавов АД31Т (*а*) и В91Т3 (*б*) после испытания в течение 5 сут при pH = 10

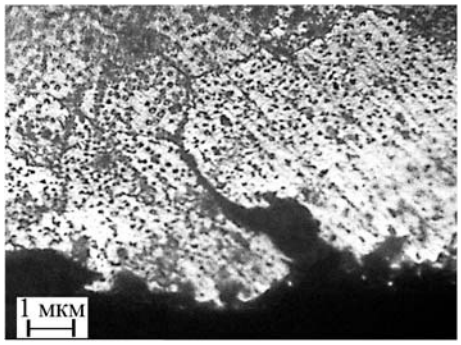


Рис. 6. Структура поверхностной зоны алюминиевой пресс-формы. ×1000

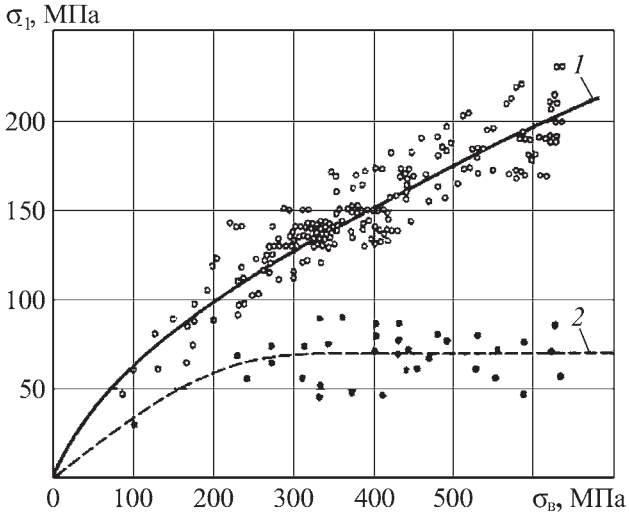


Рис. 7. Зависимость предела выносливости ($N = 10^7$ циклов) от предела прочности алюминиевых сплавов [3]:
1 – испытания на воздухе; *2* – испытания в 3%-ном растворе NaCl

воздухе, сплавы АД31Т и В91Т3 практически не отличаются по пределу выносливости, равному ≈70 МПа, в 3%-ном растворе NaCl (рис. 7). Обладая более высокой твердостью, сплав В91Т3 превосходит сплав АД31Т по обрабатываемости резанием и шлифуемости.

Выводы

1. Расчетами показано, что изменение напряжений в пресс-форме, применяемых для производства изделий из вспенивающихся пластмасс, имеет циклический характер.

2. На внешней и внутренней поверхностях пресс-форм, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, при подаче в нее под давлением гранул пенополистирола возникают растягивающие напряжения. Максимальные растягивающие напряжения наблюдаются вблизи центров длинных ребер, а также в центрах граней пресс-формы. Максимальные перемещения наблюдаются в центрах больших граней.

3. Увеличение в воде концентрации поваренной соли NaCl от 0,01 до 0,04 г/л повышает скорость коррозии сплава АД31Т в 8 раз, сплава В91Т3 – в 6 раз.

4. Наиболее низкая скорость коррозии наблюдается в воде с 6,5 < pH < 7,5. При увеличении pH от 6,5 до 10 скорость коррозии сплава АД31Т увеличивается в 15 раз, а сплава В91Т3 – в 8 раз. При понижении pH от 6,5 до 4 скорость коррозии для этих сплавов увеличивается соответственно в 6 и 3,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пучков Ю.А., Ларкин В.А., Нгуен Ш.Х., Седов О.В.** Исследование структуры и коррозионной долговечности пресс-форм из алюминиевых сплавов // МиТОМ. 2004. № 12. С. 7–12.

2. **Пучков Ю.А., Нгуен Ш.Х., Березина С.Л.** Исследование структуры и свойств никель-фосфорных и хромоуглеродных защитных покрытий для алюминиевых пресс-форм // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 3. С. 47–51.

3. **Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В.** Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973. 317 с.

Юрий Александрович Пучков, канд. техн. наук;
Хонг Шыонг Нгуен, канд. техн. наук;
Ван Яньлун, аспирант;
Светлана Львовна Березина, канд. хим. наук;
Людмила Александровна Седова, старший преподаватель

УДК 621.73

В.А. Пряничников *(ОАО "Нижегородский машиностроительный завод")*,
С.А. Герасимов *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*, **В.Л. Сивков** *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

Высокопрочная теплостойкая сталь многоцелевого назначения для изготовления высоконагруженных деталей машин

Приведены результаты исследования физико-механических свойств новой высокопрочной теплостойкой с высокой прокаливаемостью стали 20Х3Н3МФБ многоцелевого назначения, в том числе для высоконагруженных азотируемых деталей машин.

Research results of physicomechanical properties of new high-strength heat-resisting with high hardenability steel 20Kh3N3MFB multipurpose function, including for high-loaded nitrated parts of machines are resulted.

Ключевые слова: прочность; прокаливаемость; азотирование; цементация; контактная выносливость.

Key words: strength; hardenability; nitriding; cementation; contact endurance.

На крупных машиностроительных предприятиях в условиях мелкосерийного производства изделий ответственного назначения используется большое разнообразие марок сталей с малыми объемами потребления, что вызывает значительные технические и экономические проблемы.

В связи с этим создание высокопрочной стали многоцелевого назначения с повышенной теплостойкостью и прокаливаемостью для изготовления тяжелонагруженных деталей, в том числе цементуемых и азотируемых, является актуальной задачей.

Ресурс работы многих узлов современных машин в значительной степени определяется контактной усталостью, являющейся основным видом износа подшипников качения, зубчатых колес и других узлов, работающих при больших контактных нагрузках. Критерием работоспособности высоконагруженных деталей машин является контактная выносливость, которая определяет долговечность и надежность их работы.

Высоконагруженные зубчатые колеса изготовляют из легированных цементуемых сталей с твердостью упрочненного поверхностного слоя 57...63 HRC. При выборе марки стали для цементуемых деталей следует учитывать, что поверхностную твердость и глубину цементованного слоя в близких пределах можно получить на стали с различной степенью легированности и с различным содержанием углерода.

Цементуемые стали отличаются между собой главным образом в отношении обеспечения механических свойств сердцевины в зависимости от размеров поперечного сечения заготовок. Использование цементации с последующей упрочняющей термообработкой вследствие многократных высокотемпературных нагревов и охлаждений приводит к деформации деталей. Для устранения геометрических погрешностей требуется дополнительное шлифование деталей.

Азотирование, являясь низкотемпературным процессом, лишено недостатков, свойственных цементации. Однако азотирование стали, не уступая по твердости цементованным сталям, из-за высокой хрупкости азотированного слоя и малой толщины упрочненного слоя имеют более низкую контактную выносливость [1–3].

Согласно ГОСТ 21354 допускаемые контактные напряжения для азотированных зубчатых колес в 1,5 раза ниже, чем допускаемые напряжения для цементованных зубчатых колес, поэтому этот способ поверхностного упрочнения нашел широкое применение в тех случаях, когда основной причиной износа сопряженных деталей является сила трения.

Основным критерием высокой износостойкости азотированных сталей является их высокая поверхностная твердость. Чем выше твердость слоя, тем выше должна быть его износостойкость. В действующих стандартах различных отраслей машиностроения этот принцип лежит в основе выбора марок сталей и режимов их азотирования.

Известно, что из-за большой длительности азотирования в условиях повышенных температур (500...550 °С) у многих сталей снижаются механические свойства сердцевины, а также усиливаются склонности к отпускной хрупкости, что необходимо учитывать при выборе стали для азотируемых деталей. При изготовлении высоконагруженных азотируемых деталей требуется обеспечение высоких механических свойств сердцевины. В этом случае марку стали выбирают с учетом ее механических свойств в зависимости от размеров поперечного сечения заготовок.

В последние годы интерес к азотированию значительно возрос, появилось много публикаций по теории и практике этого процесса. В работах [4–6] установлена закономерность изменения контактной долговечности азотированных сталей в зависимости от

структуры слоя и химического состава деталей, выявлены основные структурные факторы, влияющие на контактную выносливость, сформулированы основные условия получения высокой контактной выносливости, разработаны основные принципы выбора состава сталей для азотирования и управления структурными факторами, выполнение которых обеспечивает высокий уровень контактной выносливости азотированных сталей:

– гетерогенное зарождение нитридных частиц в объеме зерна;

– наличие легирующих элементов (Ni), повышающих активность азота;

– превышение температуры азотирования температуры рекристаллизации стали.

По мнению авторов работ [5, 6], для реализации указанных принципов необходимо:

– применение малоуглеродистых теплостойких сталей мартенситного класса, содержащих не более 4...5 % нитридообразующих элементов, имеющих предел текучести не менее 1000 МПа и твердость 37...40 HRC после отпуска при 550...590 °С в течение 40...50 ч;

– использование предварительной термической обработки как дополнительного фактора управления размерами нитридных частиц и свойствами азотированных сталей;

– для достижения высокой устойчивости аустенита в перлитной области в Cr–Ni–Mo–V-сталях с содержанием углерода 0,18...0,22 % средняя суммарная концентрация хрома и никеля должна быть около 6 %, а содержание молибдена не менее 0,5 %. Ванадий, содержащийся в количестве, принятом для этой группы сталей, не оказывает существенного влияния на устойчивость переохлажденного аустенита;

– легирование хромом в количестве 2,5...3 % для обеспечения высокой плотности распределения нитридов в слое;

– легирование никелем (~3 %), препятствующим образованию зернограничных выделений нитридов и карбидов в виде цепочек и формирующих равномерное распределение частиц в слое и сердцевине.

С учетом изложенных принципов, а также по результатам исследовательских работ, проведенных совместно сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана и ОАО "Нижегородский машиностроительный завод":

1. Разработана и защищена патентом РФ высокопрочная теплостойкая с высокой прокаливаемостью сталь 20Х3Н3МФБ многоцелевого назначения для изготовления высоконагруженных деталей машин, в том числе для азотируемых деталей [7].

Химический состав стали приведен в табл. 1.

2. Разработаны технические условия ТУ 0958-011-08627614–95 "Поковки, прокат круглого сечения, блюмы (болванки обжатые), заготовки квадратные из высокопрочной стали марки 20Х3Н3МФБ для тяжелонагруженных улучшаемых, азотируемых и цементуемых деталей".

Гарантийные механические свойства продольных образцов из стали 20Х3Н3МФБ приведены в табл. 2.

3. Исследованы комплекс механических свойств стали 20Х3Н3МФБ в зависимости от режимов термической обработки, технологические и физические свойства, определены их количественные значения, а также установлено следующее:

– исследования распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях с содержанием легирующих элементов по верхнему и нижнему пределам по техническим условиям на сталь свидетельствуют о высокой устойчивости его в перлитной и бейнитной областях;

– подобие диаграмм распада переохлажденного аустенита сталей 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА, 20ХН3МФА и исследуемой стали 20Х3Н3МФБ;

– критическая скорость закалки составляет 160 °С/мин;

– построение термокинетических диаграмм стали 20Х3Н3МФБ и исследование распада переохлажденного аустенита показало, что промежуточное превращение стали протекает с образованием нижнего бей-

1. Химический состав стали 20Х3Н3МФБ

Содержание основных элементов, % мас.							
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb
0,18...0,22	0,17...1,37	0,30...0,60	2,80...3,20	2,70...3,30	0,50...0,65	0,10...0,15	0,05...0,10

Категория стали	Содержание примесей, % мас., не более		
	P	S	Cu
Качественная	0,035	0,035	0,30
Высококачественная	0,025	0,025	0,30
Особовысококачественная	0,025	0,015	0,25

Примечание. Допустимые отклонения по содержанию элементов в соответствии с ГОСТ 4543; наличие до 0,2 % W и до 0,03 % Ti не является браковочным признаком.

2. Гарантийные механические свойства продольных образцов из стали 20Х3Н3МФБ

Режим термической обработки для контрольных образцов	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	Ударная вязкость *KC*U, МДж/м^2, при температуре, °С		Твердость HRC
					20	–50	
	не менее						
Режим 1							
Нормализация (945±15) °С; отпуск (695±15) °С, 5 ч, воздух; закалка (885±15) °С, 1 ч, масло; отпуск (580±10) °С, 2 ч, воздух	1000	1050	10	45	0,55	0,50	37,0...43,0
Режим 2							
Нормализация (945±15) °С, 5 ч, воздух; отпуск (695±15) °С, 5 ч, воздух; закалка (885±15) °С, 1 ч, масло; отпуск (180±10) °С, 2 ч, воздух	1200	1350	8	40	0,50	0,45	40,0...46,0

нита при скоростях охлаждения, больших или равных 10 °С/мин;

– значения критических точек стали, определенные термическим методом и дилатометрией, следующие: Ac_1 = 730...750 °С; Ac_3 = 780...800 °С; $M_н$ = = 360...370 °С; $M_к$ = 250...270 °С;

– сталь отличается стабильностью прочностных и пластических характеристик при закалке от температур 820...980 °С;

– сталь сохраняет теплостойкость до 550 °С;

– прокаливаемость стали составляет не менее 100 мм как при закалке в масло, так и на воздухе;

– температурный интервал горячей обработки давлением 1180...850 °С;

– сталь флокеночувствительна, после ковки требуется проведение противофлокенного отжига;

– штампуемость аналогична штампуемости сталей 20ХН3А, 20Х2Н4А;

– технологичность при шлифовании цементуемых и азотируемых поверхностей деталей выше, чем у деталей из сталей 20ХН3А, 20Х2Н4А и 38Х2МЮА, при этом склонность к образованию шлифовочных трещин у стали 20Х3Н3МФБ ниже;

– физические свойства стали 20Х3Н3МФБ в зависимости от температуры испытаний приведены в табл. 3.

4. Разработаны и внедрены в производство следующие технологии:

3. Физические свойства стали 20Х3Н3МФБ в зависимости от температуры испытаний

Свойство	Температура испытаний, °С															
	20	40	50	60	80	100	120	140	150	160	200	300	400	500	600	700
Модуль упругости, МПа	212500	–	–	–	–	209200	–	–	–	–	202500	195400	187400	177000	163500	–
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	410	428	–	453	480	504	523	538	–	544	551	583	611	695	746	926
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	27,1	–	28,9	–	–	32,7	–	–	34,7	–	34,9	35,3	36,6	36,6	35,0	33,8
Коэффициент температуропроводности, см^2/с	0,0843	–	0,0836	–	–	0,0824	–	–	0,0814	–	0,0803	0,0778	0,0741	0,0682	0,0595	0,0471

Коэффициент линейного расширения, 10^{-6} 1/°С	Температура испытаний, °С					
	20...100	20...200	20...300	20...400	20...500	20...600
	11,7	12,7	12,7	13,1	13,5	13,9

– выплавки и разливки стали с использованием экранируемых прибыльных надставок, позволивших повысить качество кузнечных слитков [8–10];

– объемной горячей пластической деформации (ковка, штамповка) стали;

– термической, в том числе предварительной термической обработки стали, обеспечивающей получение в кованных заготовках сложной формы однородного по размеру мелкого зерна аустенита номером 11...9 (ГОСТ 5639) и высокий уровень механических свойств после отпуска при температуре 560 °С в течение 50 ч. Термическая обработка заготовок: нормализация; отпуск 650 °С, 2 ч + закалка 975 °С, 1 ч, масло; отпуск 650 °С, 2 ч + закалка 900 °С, 1 ч, масло; отпуск 650 °С, 2 ч + закалка 900 °С, 1 ч, масло; отпуск 580 °С, 2 ч. Для заготовок простой формы, в которых деформация достаточно однородна, рекомендуются однократная закалка и отпуск [11];

– газовой цементации; азотирования, обеспечивающего максимальную работоспособность деталей в парах трения и в условиях контактной усталости. Максимальная контактная выносливость стали 20Х3Н3МФБ достигается при азотировании по двухступенчатому режиму: 540 °С, 15 ч + 560 °С, 20 ч. Толщина диффузионного слоя во всех случаях составляет 0,6...0,7 мм, поверхностная твердость 800...850 HV. Предел контактной выносливости азотированной стали 2400 МПа, что соответствует контактной выносливости лучших цементуемых сталей.

Результаты данной работы внедрены в ОАО "НМЗ" при изготовлении угольных очистных комбайнов "Кузбасс-500" ("К-500"). Эффективность технических решений подтверждена длительным сроком безаварийной эксплуатации этих комбайнов на шахтах страны. Комбайн "К-500" вошел в 2004 г. в число "100 лучших товаров России" и отмечен дипломом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Герасимов С.А., Жихарев А.В., Березин Е.В. и др.** Новые идеи о механизме образования структуры азотированных сталей / Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 1. С. 13–17.

2. **Пат. 2052531 Российская Федерация.** Азотируемая сталь / В.К. Некрасов, В.С. Красильников, С.А. Герасимов и др. Опубл. 1996. Бюл. № 17.

3. **Сивков В.Л., Пряничников В.А.** Управление процессами затвердевания отливок и слитков. Нижний Новгород: НГТУ, 2003. 123 с.

4. **Сивков В.Л., Пряничников В.А., Писеев А.П. и др.** Улучшение качества стальных слитков при производстве черновых локомотивных осей / Материаловедение и металлургия: тр. НГТУ. Т. 42. 2004. С. 53–56.

5. **Пат. 2048547 Российская Федерация.** Способ обработки зубчатых колес из низкоуглеродистых вторичнотвердеющих сталей мартенситного класса / С.А. Герасимов, В.И. Кучерявый, Э.А. Елисеев и др. Опубл. 1995. Бюл. № 32.

6. **Герасимов С.А., Жихарев А.В., Березин Е.В. и др.** Новые идеи о механизме образования структуры азотированных сталей / Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 1. С. 13–17.

7. **Пат. 2052531 Российская Федерация.** Азотируемая сталь / В.К. Некрасов, В.С. Красильников, С.А. Герасимов и др. Опубл. 1996. Бюл. № 17.

8. **Сивков В.Л., Пряничников В.А.** Управление процессами затвердевания отливок и слитков. Нижний Новгород: НГТУ, 2003. 123 с.

9. **Пат. 33050 Российская Федерация.** Прибыльная надставка для изложницы / В.Л. Сивков, В.А. Пряничников, П.Я. Журавлев, А.П. Писеев. Опубл. БИиПМ, 2003. № 28.

10. **Сивков В.Л., Пряничников В.А., Писеев А.П. и др.** Улучшение качества стальных слитков при производстве черновых локомотивных осей / Материаловедение и металлургия: тр. НГТУ. Т. 42. 2004. С. 53–56.

11. **Пат. 2048547 Российская Федерация.** Способ обработки зубчатых колес из низкоуглеродистых вторичнотвердеющих сталей мартенситного класса / С.А. Герасимов, В.И. Кучерявый, Э.А. Елисеев и др. Опубл. 1995. Бюл. № 32.

Владислав Александрович Пряничников, д-р техн. наук;
Сергей Алексеевич Герасимов, д-р техн. наук;
Владимир Лаврентьевич Сивков, д-р техн. наук

Читайте в следующем номере:

- **Беляков А.И., Беляков А.А., Жуков А.А., Маццарелли Д.** Механические свойства чугуна с шаровидным графитом при повышенных температурах
- **Палавин Р.Н., Колганов В.Н., Коровин В.А., Леушин И.О., Степанов П.П., Киров А.С.** Повышение эксплуатационной стойкости литых валков горячей прокатки

Г.А. Нуждин, Г.И. Ляпина, Ю.А. Самошкин, Г.Н. Асанов *(ООО "КОНСЕРСИУМ", г. Москва)*

Вопросы внедрения системы менеджмента качества предприятия

Рассмотрены некоторые актуальные вопросы внедрения системы менеджмента качества и встречавшиеся на практике варианты их решения. Предложены рекомендации по применению процессного подхода к менеджменту.

Actual questions of quality management system implementation were considered with practical decisions. Some recommendations of process approach use were proposed.

Ключевые слова: процесс; процессный подход; внедрение; функциональный подход; система менеджмента качества; орган по сертификации.

Key words: process; process approach; implementation; functional approach; quality management system; certification body.

Один из важных этапов внедрения системы менеджмента качества (СМК) предприятия – это ее документирование. В документах обычно фиксируют результаты определения отдельных аспектов функционирования системы и устанавливают соответствующие требования.

Внедрение СМК, как правило, протекает в условиях недостатка времени, поэтому не на все простые, но принципиально важные вопросы, связанные, например, с терминологией, определением процессов и целесообразностью установления требований, разработчикам удается найти исчерпывающие и понятные для всех ответы.

Несовпадение взглядов участников разработки СМК на решение ряда важных по возможным последствиям вопросов приводит к тому, что эти вопросы откладывают. Если они и в последующем не могут быть решены, то их постепенно выявляют при аудитах СМК, инициируя в той или иной степени результативные корректирующие действия.

Основные трудно решаемые вопросы, способные породить многочисленные недостатки в СМК, связаны, прежде всего, с определением концепции процессного подхода и самой системы процессов организации.

Поэтому авторы статьи поставили задачу рассмотреть некоторые актуальные вопросы внедрения СМК и встречавшиеся на практике варианты их решения, а также рекомендации Группы практики проведения аудита по ISO 9001 при Техническом Комитете № 176 ИСО (далее – Группа практики аудита [1]).

Исследование и анализ опыта разработки, внедрения и сертификации СМК авторы провели в 52 российских предприятиях. Сфера их деятельности в основном была представлена металлургическим производством, производством машин и оборудования и услугами по обработке с использованием основных технологических процессов машиностроения.

Все исследования проведены экспертами по сертификации СМК в Органе по сертификации систем качества "КОНСЕРСИУМ" в период с 2003 по 2008 год. Основным методом сбора данных было интервьюирование, вспомогательным – анкетирование.

Сколько должно быть документов в СМК?

Значительная часть экспертов по сертификации СМК и специалистов-консультантов в области разработки и внедрения СМК имеют конкретные требования и мнения по этому вопросу. Сведения об этом обычно тиражируются и передаются от организации к организации. В результате у команды разработчиков СМК организации появляется стремление к документированию "всего, что делается", аргументированное ссылкой на п. 4.2.1 г. ГОСТ Р ИСО 9001 [2]. Часто также используют ссылки на п. 4.1 а, б, в с трактовкой термина "определить" как сформулировать и документально оформить.

Однако при трактовке указанных требований следует отдавать приоритет примечанию 2 п. 4.2.1, в котором степень документированности СМК увязана с размером организации, видом ее деятельности, сложностью и взаимодействием процессов, компетентностью персонала [2].

Необходимую степень документирования можно определить по установленным требованиям для обеспечения результативного функционирования и управления. Например, допустимо при документировании процессов ограничиться оформлением карт процессов, не забывая, что и оформление карт процессов не является установленным требованием. Не требуется в обязательном порядке документация по управлению процессами.

Предприятие может внедрить дополнительные процедуры по отношению к процедурам, определенным в ГОСТ Р ИСО 9001 как требуемые, без их обязательного документирования, если последнее позволяют размеры или уровень управленческой культуры. Главной целью документирования является способствование ритмичному и стабильному функционированию процессов [3, 4].

Предприятиям, сертифицирующим внедренную и функционирующую СМК на соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9001, необходимо представить свидетельства результативности внедрения СМК [3]. Можно демонстрировать соответствие СМК, не разрабатывая для этого большого количества документов.

Результативность процессов и СМК может быть продемонстрирована предприятием и без предоставления документированных процедур, записей и других документов, в явном виде не определенных в ГОСТ Р ИСО 9001 как обязательных. Вполне допустимо выполнять деятельность, не руководствуясь специальной документированной процедурой, а используя в качестве основы требования соответствующего раздела ГОСТ Р ИСО 9001.

В чем отличие между процессом, деятельностью, функцией?

В качестве основы для установления различий между понятиями процесс и деятельность рекомендуется использовать указания п. 2.4 и определение 3.4.1 ГОСТ Р ИСО 9000 [5].

ГОСТ Р ИСО 9001 не устанавливает требований, из которых следовала бы необходимость четкого разделения указанных понятий. Различия возникают на понятийном уровне при идентификации и организации работ. Кроме того, предприятия вправе использовать свою собственную терминологию [6], обеспечивая при этом выполнение требований ГОСТ Р ИСО 9001. Разделение понятий целесообразно делать исходя из их прикладного аспекта на конкретном предприятии.

Методология внедрения процессного подхода [4] предполагает, в частности, определение и внедрение видов деятельности внутри процессов. Поэтому можно воспользоваться одной из возможных цепочек вложения понятий: вид деятельности ← процессы ← виды деятельности ← задания ← операции [7].

Когда речь идет о предприятии в целом, то вид деятельности часто отождествляют с направлением деятельности (см. п. 4.1 и 4.4.1 [7]), поэтому цепочку понятий лучше представить в следующем виде: вид деятельности предприятия/направление деятельности ← процессы ← виды деятельности ← задания ← операции/действия.

Под деятельностью, вложенной в процесс, которая может описываться в документированной процедуре, часто понимают совокупность нескольких функций, в то время как выполнение задания в рамках одной функции определяется в инструкции, которая устанавливает последовательность выполнения операций/действий [7].

Поэтому *моделирование менеджмента качества на предприятии, в том числе определение процессов и записей, целесообразно осуществлять по видам деятельности*.

Попытки определения процессов, исходя из совокупности требований ГОСТ Р ИСО 9001, а не из результатов анализа деятельности предприятия, часто приводят к ненужному усложнению системы процессов. Из комментариев, приведенных в [6], можно заключить, что если для деятельности или совокупности видов деятельности предприятием определяются цели, входы, выходы и/или прочие характеристики, установленные в п. 4.1 ГОСТ Р ИСО 9001, то следует вести речь о необходимости определения процесса.

В связи с вопросом о соответствии СМК требованиям ГОСТ Р ИСО 9001 необходимо также поддерживать свидетельства мониторинга, измерения, анализа и улучшения процессов. Поэтому такой подход, опирающийся на утверждение о необходимости рассматривать каждый пункт и подпункт ГОСТ Р ИСО 9001 в качестве основания для определения соответствующего процесса в СМК предприятия [6], является некорректным.

Определение системы процессов в той или иной степени связано со стремлением к установлению диспетчеризации результатов процессов для управления ими (результатами) прежде всего на стыках процессов. А определение совокупности функций может служить для обеспечения полноты осуществляемой деятельности и корректности ее распределения между исполнителями.

Поэтому правильнее противопоставлять, если в этом есть необходимость, процессный и функциональный подходы, а не процессы и деятельность, как это наблюдается на практике. *Основное отличие этих подходов к выполнению работ на предприятиях можно определить в следующем виде*:

– *управление деятельностью предприятия, основанное на процессном подходе, ориентировано на управление результатами процессов*;

– *управление деятельностью предприятия, основанное на функциональном подходе, ориентировано на поддержание полноты распределенных между исполнителями функций*.

Одно из преимуществ процессного подхода состоит в том, что уже на этапе определения системы процессов даются ответы на многочисленные вопросы: "как?" "когда?", "кому?", "сколько?", "за счет каких ресурсов?" и т.д., а в ходе работы делаются необходимые уточнения в условиях достаточной прозрачности определения всего направления деятельности. При функциональном же подходе больший акцент делается на компетентность исполнителей, по мере повышения которой и улучшается работа.

Что главное в процессном подходе?

Стандартом ГОСТ Р ИСО 9001 определены обобщенные требования к процессному подходу на основе результатов анализа достижений организаций в области менеджмента. Требования стандарта являются лишь отображением наилучших практических достижений организаций, создавая при их выполнении определенные основы для доверия со стороны заинтересованных сторон. Процессный подход можно реализовать на предприятии и независимо от применения требований и потребности в демонстрации соответствия менеджмента качества этим требованиям.

Для предприятий новизна процессного подхода связана с более укрупненной декомпозицией деятельности на составляющие, что позволяет построить иерархическую модель, содержащую, по меньшей мере, два уровня моделирования: направление деятельности разбивается на процессы, в свою очередь состоящие из операций и действий по выполнению функций.

Такой подход к моделированию предполагает его реализацию "от общего к частному" и его ориентированность на параллельную оптимизацию модели, начиная с момента ее построения, а также установление основ для системного подхода к менеджменту качества.

Главное в процессном подходе связано с той пользой, которую он приносит предприятию. Возможность получения пользы от процессного подхода тесно связана с адекватностью результатов моделирования процессного подхода или системы процессов реалиям функционирования процессов, поскольку в рамках СМК оперирование процессами осуществляется на основе их моделей. Необходимо использовать принятый подход к применению процессов, подразумевая под этим модель, определенную конкретными исполнителями на основе их представлений о функционировании процессов.

Рациональное применение процессного подхода повышает результативность и эффективность предприятия в достижении установленных целей [4]. Процессный подход дает следующие возможности:

– обеспечивать интеграцию и сбалансированность процессов;

– концентрировать усилия на результативности и эффективности процесса;

– демонстрировать уверенность в последовательности предприятия в своей деятельности;

– поддерживать прозрачность операций в рамках предприятия;

– снижать затраты и длительность производственного цикла в результате эффективного использования ресурсов;

– получать улучшенные и предсказуемые результаты;

– сосредоточить внимание на приоритетных инициативах по улучшению;

– конкретизировать вовлечение персонала и его обязанности.

Основное преимущество процессного подхода по сравнению с другими подходами заключается в управлении взаимодействием между процессами, а также взаимодействием в рамках иерархической структуры предприятия.

Управленческая деятельность часто осуществляется на основе установления иерархических связей функциональных подразделений в рамках единой структуры, предполагающей создание вертикалей управления и распределение ответственности подразделений за выходные результаты выполнения функций.

Недостатки, связанные с такой организацией деятельности, часто обусловлены тем, что приоритет отдается внутренним задачам подразделений в ущерб задачам, решаемым на границах взаимодействия или в организации в целом. Процессный подход вводит горизонтальное управление, понижающее барьеры между структурными подразделениями, ориентируя их работу на решение общих задач и достижение конечных целей.

Польза от процессного подхода связана с возможностью консолидации модели управления людьми (на основе распределения функций) и модели управления результатами, полученными на выходе отдельных процессов, уменьшающей нежелательное влияние человеческого фактора в результате формализации и упрощения отношений между исполнителями всех уровней.

Получение пользы для предприятия обеспечивается:

– прозрачностью и однозначностью моделей, ведущими к единому их пониманию сотрудниками и формированию целостного восприятия всей системы процессов;

– специализацией исполнителей на основе обособления завершенных циклов осуществляемых действий;

– настроенностью на конечный, а не на локальный результат за счет установления доминирующих целей и связей;

– распределением ответственности по результатам, а не по действиям (функциям);

– улучшением управления персоналом и другими ресурсами;

– иерархичностью моделей, позволяющей однозначно определить необходимые уровни управления;

– оптимальной системой мониторинга и контроля с выделенными соответствующими функциями, касающимися управления результатами процессов на их стыках;

– ускоренной диагностикой и коррекцией любых проблем и несогласованностей;

– обоснованностью и широким обсуждением любых изменений до их внесения.

Все перечисленные факторы в той или иной степени связаны с совершенствованием контроля и управления работой предприятия.

Сколько должно быть процессов?

Выполнение требований стандарта ГОСТ Р ИСО 9001 в части определения процессов тесно связано с целесообразностью предусмотренных действий для удовлетворения требований потребителей [8, 9] и демонстрации своей способности поставлять продукцию, отвечающую требованиям потребителей и соответствующим обязательным требованиям, а также – с увеличением ценности и доверия к СМК и снижением риска невыполнения требований и ожиданий потребителей.

Применение процессного подхода зависит от предприятия, в том числе от сложности его деятельности и размера. Чем меньше предприятие, тем меньше в нем можно определить процессов. К необходимым действиям, соответствующим приемлемой концепции процессного подхода, относятся:

– определение процессов, необходимых для достижения целей предприятия в области качества, и соответствующей ответственности;

– определение и предоставление необходимых ресурсов и информации;

– установление и применение методов мониторинга, измерения и анализа процессов;

– установление и применение процесса постоянного улучшения [10].

При наличии у предприятия определенных целей в области качества появляются объективные предпосылки к установлению соответствующих процессов. Применение предприятием целей в области качества, достижение запланированных результатов и другие свидетельства успешного функционирования предприятия можно рассматривать в качестве признаков формирования соответствующих процессов.

Сложившиеся на предприятии процессы следует идентифицировать, установив подходящие способы их управления и фиксируемые записи, где это необходимо. Этим предприятие может ограничиться [4]. Для повышения результа-

тивности процессов может потребоваться их документальное определение. Для этого будет необходимо:

– установление целей процесса;
– планирование процесса;
– поддержание соответствующих записей [10].

Принимая решение о необходимости документирования того или иного процесса, предприятие может учитывать следующие факторы [11]:

– влияние на качество;
– риски неудовлетворенности потребителей;
– законодательные и другие обязательные требования;
– финансовые риски;
– результативность и эффективность;
– компетентность персонала;
– сложность процессов.

При документировании процессов можно использовать графические отображения, текстовые инструкции, вопросники, блок-схемы, наглядные пособия или электронные способы.

При определении процессов предприятия нередко идентифицируют слишком много процессов, упуская из виду, что не существует перечня процессов, которые должны быть документированы [4, 11]. Для улучшения управляемости и результативности СМК в такой ситуации можно рекомендовать определение общих потоков процессов для однородных видов продукции, выпускаемой предприятием (для направлений деятельности).

Причина определения избыточного количества процессов связана с тем, что предприятия, сертифицировавшие свои СМК, и аудиторы, занимающиеся этой сертификацией, склонны сосредоточивать свое внимание на соответствие детальным требованиям ГОСТ Р ИСО 9001, что может приводить к потере из виду основных требований, связанных с соответствием продукции.

Соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9001, относящимся к вопросам управления документацией, записями, компетентностью персонала, метрологическим обеспечением производства является важным, но не должно занимать центральное место в СМК, оставаясь лишь средством достижения желаемых результатов, всегда связанных с соответствием продукции.

Выводы

1. **Документы,** необходимые для СМК, определяют на основе результатов анализа процессов с учетом требований ГОСТ Р ИСО 9001.

2. **Процесс** – это сложившаяся на предприятии объективная реальность, которая возникает из стремления к совершенствованию и повышению стабильности работы. Поэтому при разработке и внедрении системы менеджмента качества важнейшей задачей является корректная идентификация сложившихся процессов и их взаимодействия в среде процессов и функций.

3. *Разработка СМК предприятия – это построение ее модели менеджмента качества. Внедрение СМК – перенос требований разработанной модели на реальные условия работы.* Если модель адекватна установившимся на предприятии формам и способам ее работы, то внедрение протекает легко и без противоречий.

4. Результат идентификации или определения процесса, результат его документирования зачастую не способны изменить устоявшегося на предприятии способа выполнения работ в виде процесса или деятельности. Этот способ работ является первичным, а идентификация, определение или документирование является лишь инструментом его отображения или моделирования. Формально отнесение способа организации работ к процессам или деятельности зависит от применимости к ним требований раздела 4.1 ГОСТ Р ИСО 9001.

ЛИТЕРАТУРА

1. **http://www.iso.org/tc176/ISO9001** Auditing Practices Group Guidance on: Introduction to the ISO 9001 Auditing Practices Group.

2. **ГОСТ Р ИСО 9001–2001.** Системы менеджмента качества. Требования. М.: ФГУП "Стандартинформ", 2005. 22 с.

3. **http://www.iso.org/tc176/sc2/N525R** Guidance on the Documentation Requirements of ISO 9001:2000.

4. **http://www.iso.org/tc176/sc2/N544R2(r)** Guidance on the Concept and Use of the Processes Approach for management Systems.

5. **ГОСТ Р ИСО 9000–2001.** Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Госстандарт России, 2001.

6. **http://www.iso.org/tc176/ISO9001** Auditing Practies Group Guidance on: Identification of processes.

7. **ГОСТ Р ИСО /ТО 10013–2007.** Менеджмент организации. Руководство по документированию системы менеджмента качества. М.: Стандартинформ, 2007.

8. **http://www.iso.org/tc176/ISO9001** Auditing Practices Group Guidance on: Determination of the "where appropriate" processes.

9. **http://www.iso.org/tc176/ISO9001** Auditing Practices Group Guidance on: Auditing "where appropriate" requirements.

10. **http://www.iso.org/tc176/ISO9001** Auditing Practices Group Guidance on: Understanding the process approach.

11. **http://www.iso.org/tc176/sc2/N544R** Guidance on the Concept and Use of the Processes Approach for management Systems.

Георгий Анатольевич Нуждин, канд. техн. наук, генеральный директор;
Галина Ивановна Ляпина, нач. отдела сертификации;
Юрий Алексеевич Самошкин, нач. научно-методического отдела;
Глеб Николаевич Асанов, инженер отдела сертификации

Ю.Г. Гуревич *(Курганский государственный университет)*

Использование отходов коррозионно-стойкой стали для изготовления карбидостали TiC–Х18Н10Т

Исследована возможность использования отходов коррозионно-стойкой стали для производства износостойкого композиционного материала – карбидостали. Найдены оптимальные составы карбидостали системы TiC–Х18Н10Т и оптимальные режимы производства деталей с высокими механическими свойствами.

The article shows the possibility to use the waste of corrosion-resistant steel for the production of wear-resistant composition – carbide-steel. The optimum composition of carbide-steel of the following system TiC–Kh18N10T and optimum regimes of production of details with the high mechanical characteristics have been found.

Ключевые слова: порошковая металлургия; отходы; коррозионно-стойкая сталь; карбид титана; пропитка; температура; режим; микроструктура; износостойкость.

Key words: powder metallurgy; waste material; corrosion-resistant steel; titanium carbide; saturation; temperature; regime; microstructure; wear-resistance.

Распространенным способом получения изделий из карбидостали является спекание хорошо перемешанных порошков карбида титана с порошками легированных сталей или пропитка заранее спеченного карбидного каркаса легированной сталью. Два этих способа связаны с изменением размеров карбидного каркаса.

Широкое применение карбидосталей ограничивается сложностью технологии их изготовления, изменением размеров изделий в период спекания или пропитки, а также дороговизной и дефицитностью порошковых легированных сталей и ферросплавов.

Для того чтобы исключить применение дорогостоящих порошков легированных сталей и сохранить размеры детали при спекании, была разработана новая технология производства деталей из карбидостали путем пропитки несеченых карбидных прессовок расплавленной сталью. В качестве исходных материалов выбрали карбид титана и сравнительно дешевые отходы коррозионно-стойкой стали Х18Н10Т.

Предварительными экспериментами установили, что при пропитке сырого (неспеченного) каркаса из карбида титана объем усадки уменьшается в такой степени, что ее можно устранить совсем. Однако механическая прочность карбидных прессовок оказалась достаточно низкая и это затрудняло их транспортировку и организацию пропитки.

Для повышения прочности прессовок из карбида титана использовали глицерин. Установили, что оптимальное содержание глицерина составляет 9...13 % мас. При таком содержании глицерина прессовки выдерживали даже незначительные динамические нагрузки и сохраняли свои размеры. Физико-механические свойства прессовок приведены в табл. 1.

В экспериментах использовали карбидные каркасы со средней объемной пористостью 40, 45 и 50 %. Порошок карбида титана после просеивания через сито с размером ячейки 63 мкм по оценке под микроскопом имел средний размер частиц 5,7 мкм. Определение дисперсности порошка электродинамическим методом показало, что его удельная поверхность равна (1860±90) см^2/г, а средний диаметр частиц не более (6,2±0,6) мкм.

Глицерин вводили в порошок карбида в жидком состоянии, прессование образцов осуществляли в разогретых до 60...70 °С пресс-формах при давлении 20...90 МПа. Сушку прессовок и частичное удаление наполнителя осуществляли в вакуумном шкафу в течение 8...16 ч в зависимости от массы прессовок.

В табл. 2 приведены пористость и размеры пор получаемых образцов в зависимости от давления прессования (средние значения из 7 измерений).

Пропитку прессовок осуществляли контактным способом путем укладки стальных материалов на прессовку карбида титана. Стальными материалами служили отходы ста-

1. Физико-механические свойства прессовок из карбида титана

Давление прессования, МПа	Пористость, %	Прочность при сжатии, МПа
20	50 ± 2	5,0
25	45 ± 2	5,6
30	40 ± 2	7,0

2. Пористость и размеры пор прессовок из карбида титана

Давление прессования, МПа	Общая пористость, %	Диаметр пор, мкм	
		максимальный	минимальный
100	39±2,0	3,8±1,4	2,4±1,2
50	44±1,8	5,0±3,6	4,5±2,2
20	53±2,2	6,2±2,2	5,1±1,6

3. Размеры карбидного каркаса после пропитки сталью Х18Н10Т при 1450...1500 °С

Размеры прессовки, мм					
до пропитки			после пропитки		
a (*R*)	*b* (*r*)	*h*	*a* (*R*)	*b* (*r*)	*h*
Пластинка					
16,47	16,47	5,00	16,57	16,57	5,01
16,50	16,50	5,00	16,52	16,52	5,00
16,51	16,51	5,00	16,54	16,54	5,02
16,48	16,48	5,03	16,51	16,51	5,01
16,48	16,48	5,01	16,50	16,50	5,02
Кольцо					
28,25	14,60	10,02	28,35	14,53	10,01
28,18	14,58	10,01	28,32	14,50	10,03
28,23	14,55	10,02	28,36	14,50	10,02
28,28	14,58	10,01	28,41	14,52	10,04
28,25	14,58	10,01	28,45	14,54	10,02

Обозначения: *a* – сторона основания; *b* – толщина; *h* – высота, *R*, *r* – радиус нижнего и верхнего основания соответственно.

ли Х18Н10Т. Объем применяемых для пропитки отходов стали Х18Н10Т превышал на 10...20 % объем пор карбидного каркаса.

Нагрев прессовок для пропитки проводили в печи сопротивления с графитовым нагревателем в контейнерах. Контейнеры изготовляли из низкопористого графита, обеспечивающего необходимую равномерность распределения температуры по всему объему контейнера. При продувке такого контейнера очищенным аргоном в нем поддерживалась слегка восстановительная атмосфера.

Для удобства расположения прессовок в контейнере использовали графитовые стаканчики. Предотвращение окисления образцов в период нагрева и охлаждения осуществляли защитными засыпками. В качестве засыпок использовали смесь, состоящую из 90...95 % об. глинозема (оксида алюминия) и 5...10 % об. порошка графита. Перед употреблением смесь просушивали и прокаливали.

На дно графитового стаканчика насыпали слой смеси глинозема с графитом толщиной 5...10 мм, на которую клали карбидную прессовку, а на нее – пропитывающий сплав. Оба материала также засыпали смесью глинозема с графитом. Стаканчики с образцами загружали в контейнер, который закрывали крышкой и помещали в нагревательную печь.

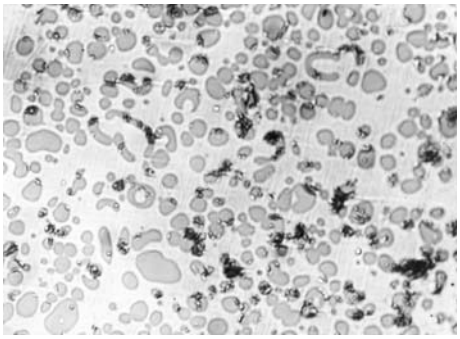
Отработка режимов пропитки заключалась в установлении оптимальной температуры пропитки, времени выдержки при этой температуре, скорости нагревания и охлаждения изделий, остаточной пористости, степени пропитки, возможности отделения остатков пропитывающего материала от готовых изделий и определения качества их поверхности. Режимы пропитки исследовали при температуре (1450±10) °С.

Опыты подтвердили, что при температурах ниже 1450 °С жидкотекучесть стали недостаточна и мелкие поры не заполняются расплавом. При температурах пропитки выше 1490 °С иногда наблюдали разъедание карбидного каркаса в верхней части прессовки. Таким образом, оптимальная температура пропитки карбидного каркаса, обеспечивающая 100 % пропитки, практически без остаточной пористости (остаточная пористость 0...3,2 %), составляет (1460±10) °С.

Из табл. 3 следует, что размеры детали после пропитки практически не изменяются.

Структура карбидосталей, полученных методом пропитки неспеченного карбидного каркаса стальными расплавами, состоит из разобщенных зерен карбида титана размером 2...7 мкм сфероидальной или полиэдрической формы, достаточно равномерно распределенных в цементирующей их связке (рисунок).

Структуры свидетельствуют о том, что в период пропитки неспеченного карбидного каркаса сталями и сплавами происходит полное разрушение контактных перемычек. Это можно объяснить активным взаимодействием между жидкими сплавами и карбидом титана, которое из-за недостаточной прочности контактных участков приводит к проникновению расплава к местам контакта и полному разрушению первоначального карбидного каркаса.



Микроструктура карбидостали TiC–45 % Х18Н10Т. ×200

4. Механические свойства карбидостали TiC – Х18Н10Т

Состав, % об.		Твердость, HRC		Прочность при сжатии, МПа		Прочность при изгибе, МПа	
		после					
TiC	Сталь	пропитки	закалки	пропитки	закалки	пропитки	закалки
55	45	71,4 ± 1,6	74,0 ± 1,7	1200...1300	1300...1350	530...580	580...620
45	55	67,4 ± 1,4	72,5 ± 1,3	900...1100	1100...1200	630...660	650...680

В структуре карбидостали кроме мелких встречаются и крупные зерна карбида титана размером 10...30 мкм. Крупные зерна имели остроугольную или правильную форму. По-видимому, из-за большого размера они не успевали растворяться в расплаве во время пропитки.

Остроугольная форма зерен свидетельствует о том, что их диффузионный рост через жидкую металлическую фазу также был затруднен либо из-за небольшого времени пропитки, либо из-за насыщенности расплава карбидом титана. Наблюдаемое количество крупных зерен не превышало 4...8 % об. Такое количество крупных зерен, как известно [1], не оказывает значительного влияния на механические свойства композиционного материала.

Округлая форма мелких частиц карбида титана подтверждает их частичное растворение в стальной связке в период пропитки. Отдельные зерна округлой формы и коагулированные агрегаты частиц карбида титана хорошо видны под микроскопом при больших увеличениях. В то же время средний размер основной массы включений меньше, чем в исходном порошке.

После пропитки карбидосталь подвергали закалке. Наиболее полное растворение карбидов в аустените наблюдали при нагреве карбидостали под закалку до температуры 1000 °С и выдержке при этой температуре 1 ч [2]. После закалки магнитным взвешиванием определяли минимальную массу α-фазы, параметр решетки легированного аустенита после закалки составляет a = 3,656 Å.

Таким образом, выдержка 1 ч при температуре закалки обеспечивает растворение необходимого количества карбидов титана в аустените, а последующее охлаждение с высокой скоростью способствует фиксированию в твердом растворе достаточно большого количества карбидной фазы, которая обеспечивает необходимую аустенитную структуру стальной матрице.

Закалку образцов от температуры нагрева проводили в масло. Поводок, короблений и изменений размеров образцов в процессе закалки не обнаружили. Превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ при закалке карбидостали TiC–45 % Х18Н10Т объясняется растворением карбидов титана в аустените в период нагрева и выдержки сплава. В результате быстрого охлаждения углерод и титан остаются в твердом растворе.

В табл. 4 приведены механические свойства карбидостали после пропитки и закалки.

Трение и износ по схеме "диск–колодка" исследовали при давлении 0,2...0,4 МПа и скорости скольжения 0,35 м/с. Получили, что при увеличении давления уменьшается коэффициент трения и увеличивается интенсивность износа.

Причину наблюдаемых явлений можно объяснить исходя из теории положительного градиента механических свойств: при трении из-за высоких температур на поверхности трущихся образцов образуются оксиды (Fe_2O_3 и Fe_3O_4), которые понижают коэффициент трения вследствие погашения сил молекулярного притяжения и образующейся хрупкой пленки, которая, разрушаясь, блокирует разрушения в тонком поверхностном слое.

При повышении давления износостойкость и коэффициент трения уменьшаются. Увеличение тугоплавкой фазы в карбидостали закономерно приводит к повышению износостойкости, что связано с ростом твердости материала. Коэффициент трения с увеличением карбида титана в сплаве также уменьшается.

Проведенные испытания показали достаточно высокую износостойкость карбидостали TiC–Х18Н10Т по сравнению с литыми и прокатанными сталями.

Эксплуатационные свойства карбидостали TiC–45 % Х18Н10Т проверены при работе износостойких втулок. Втулки из карбидостали TiC–45 % Х18Н10Т показали стойкость, превышающую в несколько раз стойкость аналогичных втулок из легированных инструментальных сталей.

Карбидосталь TiC–45 % Х18Н10Т можно рекомендовать в качестве износостойкого материала для конструкционных деталей узлов сухого трения, а также деталей, работающих в агрессивных средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуревич Ю.Г., Нарва В.К., Фраге Н.Р.** Карбидостали. М.: Металлургия, 1988. С. 142.

2. **Гуревич Ю.Г., Савиных Л.М.** Теоретические и технологические основы получения качественных изделий из карбидостали // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 40–42.

Юрий Григорьевич Гуревич, д-р техн. наук

Поздравляем!

Киру Борисовну Поварову

доктора технических наук, профессора, академика АПК

с юбилеем

Кира Борисовна Поварова родилась 9 сентября 1933 г. в семье служащего.

Закончила Московский институт стали и сплавов, защитила кандидатскую и докторскую диссертации. В настоящее время работает главным научным сотрудником Института металлургии и металловедения РАН.

К.Б. Поварова является известным специалистом с международным именем в области материаловедения и создания сплавов на основе тугоплавких металлов – вольфрама и рения, тяжелых сплавов и сплавов и композитов нового класса – легких жаропрочных материалов на основе интерметаллидов. Она член Ученого совета ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, заместитель главного редактора журнала "Металлы", член редакционного совета журнала "Заготовительные производства в машиностроении", является членом ряда специальных Экспертных советов и комиссий по металлическим материалам.

Кира Борисовна подготовила шесть кандидатов наук, преподает материаловедение в МАТИ им. К.Э. Циолковского. К.Б. Поварова является автором и соавтором более 300 научных публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе четырех монографий, имеет 18 авторских свидетельств СССР и восемь патентов РФ. Работы К.Б. Поваровой по материаловедению конструкционных жаропрочных и высокопрочных сплавов на основе интерметаллидов и тугоплавких металлов получили признание в нашей стране и за рубежом. Она является руководителем работ по созданию сплавов и композитов на основе интерметаллидов и тяжелых вольфрамовых сплавов, выполняемых в рамках ряда научных и инновационных проектов Президиума РАН, Министерства обороны РФ, Российского фонда фундаментальных исследований, Федеральных целевых научно-технических программ Миннауки.

За заслуги в научной деятельности К.Б. Поварова удостоена Государственной премии СССР, премии Правительства РФ, премии Президиума РАН им. П.П. Аносова.

Коллектив редакции и редакционный совет поздравляют
Киру Борисовну Поварову с юбилеем!
Желаем крепкого здоровья, благополучия,
успехов на благо российской науки и образования.

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 *Погорелова Т.Н.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 03.10.08 г. Подписано в печать 27.11.08 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,40. Заказ 1211. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.