ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 3 март 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.

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.: (495) 268-47-19, 268-69-19
Факс: (495) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Давыдов С.В. Кристаллизация шаровидного графита в расплаве высокопрочного чугуна . . . 3
Миненко Г.Н. Воздействие гидродинамического состояния металлического расплава на условия растворения модификатора . . . 8
Жуковский С.С., Коршаков А.Г. Синтетические литейные связующие для новых технологических процессов . . . 10
Карабанов В.В. Эрозионно-растворный процесс при пайке . . . 15

Кузнечно-штамповочное производство

Навроцкий А.Г. К 100-летию со дня рождения Г.А. Навроцкого . . . 20
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. Выбор значений коэффициентов обратной связи электрогидравлической системы управления подвижной траверсой штамповочного пресса на этапе проектирования . . . 22
Езжев А.С., Ковалёв В.Г., Лёгких А.Н. Формование наружной резьбы на трубных заготовках . . . 30
Бурлаков И.А. Особенности изотермической раскатки и ротационной вытяжки заготовок из никелевых сплавов . . . 34

Прокатно-волочильное производство

Филиппов А.А., Пачурин К.Г., Пачурин Г.В., Гущин А.Н. Ресурсосберегающая технология подготовки калиброванного проката под холодную высадку изделий . . 37

Материаловедение и новые материалы

Попов В.С., Скоробогатых В.Н., Щенкова И.А. Исследование влияния режимов термической обработки на свойства высокохромистых сталей для энергетических установок . . . 41
Осадчий В.Я., Бабурин М.А., Екимова Е.Г. Влияние низких температур на пластичность стали 12Х25Н16Г7АР . . . 47

Информация

Филина А.В., Грядунов И.М. Автоматизация сбора и обработки данных при отрезке заготовок от пруткового материала фасонного профиля . . . 49
Каменарович М.Б. Улучшение прочностных свойств при наложении электромагнитного поля . . . 52
Решение Совета директоров предприятий кузнечно-прессового, литейного машиностроения и заготовительных производств – членов Российской Ассоциации "Станкоинструмент" . . . 54

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)

№ 3 March 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.

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.: (495) 268-47-19, 268-69-19
Fax: (495) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Davydov S.V. Globular graphite crystallization in melt of high-duty cast iron 3
Minenko G.N. Influence of modifier solution conditions on mechanical properties of gray iron 8
Zhukovsky S.S., Korshakov A.G. Synthetic foundry binders for new processes 10
Karabanov V.V. Erosive-soluble process during soldering 15

Forging and Stamping Productions

Navrotsky A.G. To G.A. Navrotsky centenary 20
Goido M.E., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M. Feedback coefficient choice of electrofluidic control by walking beam of stamping press at design phase 22
Ezzhev A.S., Kovalev V.G., Legkikh A.N. Forming of external thread on tubular workpieces 30
Burlakov I.A. Features of isothermal rolling and flow forming of blanks from nickel alloys 34

Rolling and Drawing Productions

Philippov A.A., Pachurin K.G., Pachurin G.V., Gushchin A.N. Preparation of the calibrated hire for manufacturing fixing products without thermal processing . . . 37

Physical Metallurgy and New Materials

Popov V.S., Skorobogatykh V.N., Shchenkova I.A. Research of heat treatment regimes influence on high-chromium steels properties for power installations 41
Osadchy V.Ya., Baburin M.A., Ekimova E.G. Influence of low temperatures on plasticity of steel 12Kh25N16G7AR 47

Information

Filina A.V., Gryadunov I.M. Automation of acquisition and data processing at cutoff of half-finished products from barstock material of shaped section 49
Kamenarovich M.B. Improvement of pieces durables properties by applied of electromagnetic field 52
The resolution of the factories Board of forge-and-press, foundry mechanical engineering and blanking production – members of Russian Association 54

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 669.11.241

С.В. Давыдов *(Брянский государственный технический университет)*

Кристаллизация шаровидного графита в расплаве высокопрочного чугуна

С учетом фуллереновой природы железоуглеродистых расплавов рассмотрены возможные механизмы образования шаровидного графита в высокопрочном чугуне и особенности его строения.

Talking into account of iron-carbon melts fulleren nature possible mechanisms of spherical graphite formation and feature its structure are considered.

Модели кристаллизации шаровидного графита достаточно подробно изложены и обобщены в работах К.П. Бунина и Ю.Н. Тарана, А.П. Любченко, К.И. Ващенко и Л. Софрони, И.Г. Неижко, Я.Е. Гольдштейна, А.М. Михайлова и др. Анализ результатов многочисленных экспериментов по исследованию структуры глобуля графита в высокопрочном чугуне и модельных сплавах системы Ni–C позволяет сделать следующие общие выводы:

1. Характерной особенностью глобулей графита является их слоистое строение. Слои располагаются практически перпендикулярно к радиусу включения и глобуль графита обладает той же слоистой субструктурой, что и пластинчатый графит.

2. Одним из основных структурных элементов сферолитов являются большеугловые границы наклона, образованные поворотом кристаллитов вокруг оси, лежащей в плоскости базиса. Разворот соседних секторных областей соответствует углу ~ 40° и такое значение угла разориентировки является типичным для многих сростков графита. Большеугловые границы наклона являются обязательной структурной особенностью периферийных зон компактных и шаровидных зерен в модифицированных и быстроохлажденных высокопрочных чугунах и сплавах на основе Ni–C.

3. Зона травимости большеугловых границ, выявляемая ионным травлением, объясняется как результат образования границ двойникового типа с высокой степенью дефектности.

4. Графитный сферолит состоит из кристаллитов пирамидальной формы, сходящихся своими вершинами в центре включения. Плоскость базиса параллельна основанию каждой пирамиды, но основания пирамид разориентированы друг относительно друга с образованием большеугловых границ. Структура кристаллита имеет дендритное строение. Следовательно, шаровидный графит – поликристалл в противоположность пластинчатому графиту, который является слоистым монокристаллом.

5. Установлено, что кристаллизация шаровидного графита может идти по гетерогенному механизму на основе тугоплавких соединений сфероидизирующих элементов с кислородом, серой и фосфором.

6. Наряду с гетерогенной структурой центра глобуля графита наблюдается и гомогенная структура центра сферолита.

7. С открытием фуллеренов и структур на основе фуллеренов в ряде работ, например [1], предпринимаются попытки объяснения механизма образования шаровидного графита на основе этих структур. По данной проблеме следует отметить работы А.А. Жукова [2] и М.М. Закирничной*.

Целью данной работы является привлечение достижений в области химии фуллеренов и новых представлений о структуре железоуглеродистых расплавов для объяснения формирования макро-, микро- и наноструктур в глобулях шаровидного графита.

---

* Закирничная М.М. Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях: Автореф. дисс...докт. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2001.

Микрокристалл лонсдейлита как промежуточная фаза при образовании гомогенных графитных зародышей

Определяющую роль в самоорганизации структуры железоуглеродистых расплавов играют высокоуглеродистые кластеры и их распад по механизму спинодального расслоения на низкоуглеродистые и высокоуглеродистые зоны. С понижением температуры система самопроизвольно структурируется на две фазы с различной структурной организацией.

К высокоуглеродистой фазе, образующейся в результате спинодального расслоения расплава чугуна, можно применить положение жидкокапельной углеродной модели, широко используемой при оценке процессов образования фуллереновых структур [3], что дает предпосылки для рассмотрения гипотезы процесса формирования зародышей графита на кристаллах кубической модификации алмаза – лонсдейлита – как промежуточной фазе.

Лонсдейлит имеет следующие особенности [4]:

1. Микрокристаллы малы $(100...500)\cdot10^{-9}$ м и являются монокристаллическими зернами.

2. Решетки лонсдейлита обладают высокой плотностью дислокаций и концентраций дефектов упаковки на базисной плоскости, что облегчает зарождение точек роста графита на его поверхности.

3. Это метастабильная фаза, которая при уменьшении давления пара углерода менее $p_{лонсд} = 8\cdot10^9$ Па переходит в графит.

4. Лонсдейлит и графит когерентно сопрягаются, что объясняет обратимость свободной трансформации перехода графита в лонсдейлит и наоборот.

Следовательно, центрами кристаллизации графита могут быть микрокристаллы лонсдейлита как термодинамически и кристаллографически наиболее выгодные подложки, тензоактивные по отношению к графиту (принцип Данкова), которые образуются на начальном этапе зародышеобразования.

Процесс образования и роста центра кристаллизации графита на основе кристалла лонсдейлита может заключаться в следующем. При спинодальном расслоении высокоуглеродистой флуктуации на основе фуллереновых кластеров образуются капли "жидкого" углерода, в которых происходит полимеризационное структурирование с образованием углеродной наночастицы. При этом вполне вероятно формирование металлофулерита на базе железа. В процессе роста углеродной наночастицы до размеров, обеспечивающих требуемый уровень "лапласовского" давления, происходит перестройка фуллереновых структур с образованием кристаллической решетки лонсдейлита.

Следует отметить, что превращению фуллерена (железофуллерена) в кристалл лонсдейлита в значительной степени способствует железо, как катализатор перестройки кристаллической решетки [4]. Рост кристалла-зародыша лонсдейлита протекает с образованием на его поверхности, являющейся каталитически активной по отношению к углероду, углеродной "шубы" или монослоев углерода. С ростом размеров кристалла лонсдейлита при снижении "лапласовского" давления ниже уровня $p_{лонсд} = 8\cdot10^9$ Па [3] начинается процесс превращения лонсдейлита в графит и его дальнейший рост уже как зародыша графита.

По второму сценарию развития в жидкокапельной модели зародыша может произойти кристаллизация жидкого углерода с образованием аморфного графита [5] без образования микрокристалла лонсдейлита.

Рассмотренный процесс формирования кристалла лонсдейлита не противоречит термодинамике жидкого чугуна и решает две проблемы структурообразования в чугунах: проблему гомогенного (квазигомогенного) зародышеобразования графита и объясняет в ряде случаев отсутствие в центре графитных глобулей высокопрочного чугуна неметаллических включений.

Кластеры железа как каталитические центры кристаллизации графита

Последние исследования [6–9] подтверждают возможность каталитического действия железа и образование зародышей графита на кластерах (монокристаллах) железа.

В исследованиях [6] установлено, что при охлаждении неравновесных расплавов системы Fe–C отмечается фрактальная упорядоченность образующихся микрокристаллов железа и их внешняя поверхность служит местами зародышеобразования фуллереноподобных углеродных форм при их самоорганизации в виде твердого рентгеноаморфного углерода, покрывающего монокристаллы железа тонкой пленкой. Показано, что моноатомная пластина железа под воздействием атомов углерода из плоского состояния переходит в сложноизогнутую поверхность, в которой исчезает периодичность структуры кристаллической решетки железа. В результате образуется рентгеноаморфный кластер, содержащий железо и углерод и фактически являющийся каталитическим зародышевым центром, вокруг которого формируется углеродная оболочка из фуллереноподобных структур.

Дальнейший рост железоуглеродистого кластера происходит за счет присоединения к углеродной оболочке фуллеренов [7], образующих гомогенный зародыш графита. Рост зародыша графита осуществляется, прежде всего, за счет присоединения к его поверхности фуллерена C_{20}, обладающего высокой термической стабильностью до температуры 4500 K [8].

В работе [9] впервые построена изотермическая кинетическая диаграмма начала процесса гомогенной нуклеации переохлажденного расплава железа, в соответствии с которой интенсивная стадия роста гомогенного зародыша железа закритического радиуса происходит в интервале температур 1180...1240 K, соответствующем температуре эвтектического превращения в чугунах. Следовательно, можно предполо-

жить, что сущность процесса модифицирования чугуна и зарождения центров графитизации заключается в интенсификации процесса гомогенной нуклеации расплава железа.

Формирование шаровидного графита на основе кластера коранулена

Установлено [3, 7, 8], что зародышем при кристаллизации структуры фуллерена является кластер C_{20} со структурой молекулы коранулена – загнутый листок моносетки углерода, представляющий собой пятиугольник, окруженный шестиугольниками (рис. 1).

Кластер C_{20} имеет следующие преимущества по сравнению с другими кластерами углерода: он обладает наибольшей энергией связи и стабилен до температуры 4500 К; кластер уже изогнут в основном состоянии в противоположность графитовому листку без пятиугольника в структуре; оставшаяся часть фуллерена кристаллизуется вокруг кластера C_{20} как зародыша, затрачивая минимум энергии на изгибание сферы.

При росте шаровидного графита должна зарастать призматическая поверхность, как имеющая больший уровень поверхностной энергии. В литературе принят такой термин при характеристике механизма роста шаровидного графита: "растущий кристалл шаровидного графита плоскостью базиса отгораживается от расплава". Однако в силу каких причин происходит разворот плоскости базиса, и как происходит формирование сферической поверхности из плоских пинакоидов – далеко не ясно. Ведь и пластинчатый графит фактически тоже отгораживается от расплава плоскостью базиса.

Модели образования фуллеренов дают ответ на вопрос формирования шаровидного графита. Сферическая поверхность шаровидного глобуля как и сферическая поверхность фуллерена собирается из кластерной молекулы коранулена, которая имеет две важнейшие особенности: она имеет изначально изогнутую форму и плоскость призмы у нее вырождена в толщину углеродного лепестка коранулена, что соответствует диаметру атома углерода, т.е. плоскость призмы фактически отсутствует.

При кристаллизации шаровидного графита условная "плоскость призмы" коранулена замыкается сама на себя после формирования углеродного корануленового слоя на поверхности глобуля, что полностью соответствует реализации закона Вульфа–Кюри. До настоящего времени единственным механизмом, способным объяснить разворот пластин графита, являлся механизм двойникования и расщепления.

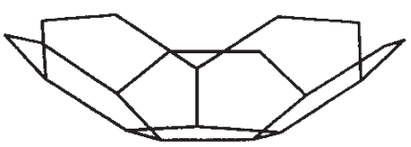


Рис. 1. Кластер C_{20} со структурой молекулы коранулена [3, 8]

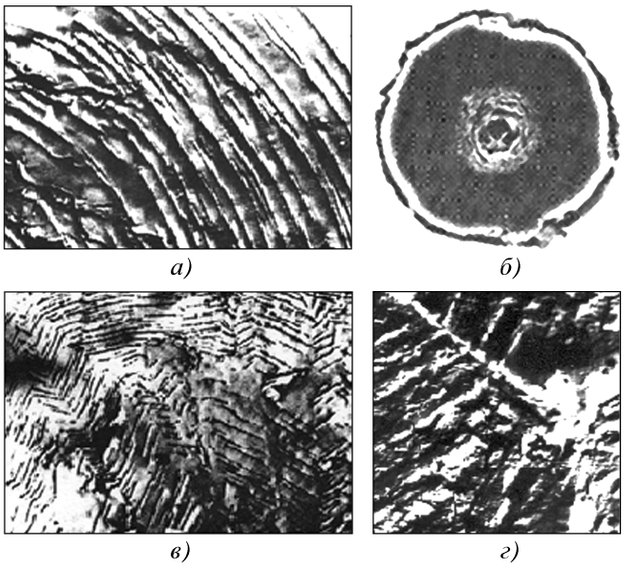


Рис. 2. Структура глобуля:
а – концентрические бесструктурные полосы, ×20 000; *б* – слоистая структура глобуля, по J. Kasperek; *в* – дендритная структура графитного глобуля на периферии включения, ×10 000; *г* – дендритное строение кристалла графита, ×20 000

Формирование узких концентрических колец вблизи центра глобуля (рис. 2, *а*) объясняется наличием высокоуглеродистой жидкой оболочки вокруг растущего включения графита. Высокоуглеродистая оболочка является своеобразным промежуточным "реактором", в котором из потока атомарного или полимолекулярного углерода расплава формируются кластеры коранулена, "раскатывающиеся" на поверхности растущего графитного глобуля и создающие турбостратный бесструктурный графит, превращающийся под воздействием высокого давления в аморфный ленточный графит. Магний в этом случае выполняет сразу три важнейшие функции: очищает поверхность растущего графита от серы и кислорода, повышает поверхностное натяжение и является катализатором процесса формирования углеродных слоев (эффект магниевого "гало" Х. Итофузи). Из-за высокого поверхностного давления в этой зоне рост дендритов графита невозможен.

Наряду с коранулено-магниевыми макромолекулами в зону кристаллизации начинают поступать полимерные образования и фуллереновые кластеры, в формировании которых начинает играть роль каталитическая активность железа. Однако смена формы растворенного углерода не изменяет структуру колец – она по-прежнему аморфная и турбостратная. Ровная, гладкая поверхность колец указывает на важнейшую особенность кристаллизации графита – активные точки дендритного роста отсутствуют, поскольку активна (химически или каталитически) вся

поверхность графитового слоя или кольца. В условиях высокого уровня поверхностного натяжения расплава (поверхностное давление сломало бы тонкие дендритные ветви) и мощных потоков углерода на начальных этапах роста дендритный рост графита практически невозможен.

Стыки лент или слоев формируют зону с высокой плотностью дефектов, которая проявляется при ионном травлении (рис. 2, *а*). Возможность формирования ленточных структур графита на основе фуллеренов показана в работе [9].

Высокодефектная стыковочная зона не связывает аморфные слои углерода между собой и они легко отслаиваются друг от друга, образуя слоистое строение глобуля в его центральной части (рис. 2, *б*).

С ростом размеров глобуля понижается уровень поверхностного натяжения, а с уменьшением поверхностного натяжения возникают условия дендритного роста (рис. 2, *в*), т.е. появляются активные точки роста, что свидетельствует о блокировании части активной поверхности углеродного кольца поверхностно-активного элемента (ПАЭ).

Дендритный рост резко увеличивает контактную поверхность роста (у шара она минимальна), снижает поверхностное натяжение и растущие дендриты (рис. 2, *г*) могут принимать из расплава уже более простые формы полимеризированного углерода.

Строение центрального ядра графитного глобуля

Условия зарождения графитного включения и форма существования углерода в расплаве отражаются и на структуре его включений. При гетерогенном зарождении в структуре шаровидного графита наблюдается неметаллическое включение (рис. 3, *а*), при гомогенном зарождении – однородное центральное ядро (рис. 3, *б*). Одна из проблем строения гомогенного графитного глобуля – структура его центрального ядра.

Модель зародышеобразования графита из "жидкой" углеродной фуллереновой капли и (или) из микрокристалла лонсдейлита предполагает, что по мере снижения давления пара углерода происходит рост

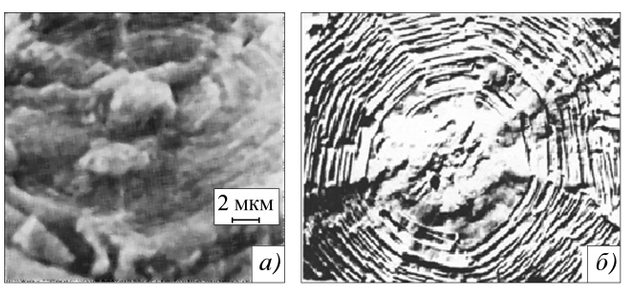


Рис. 3. Структура центрального ядра шаровидного глобуля: *а* – неметаллическое включение, по J. Kasperek; *б* – гомогенное ядро, ×10 000

включения графита и снижение значений таких параметров системы, как температура и давление, обеспечивающих стабильность жидкого углерода и лонсдейлита в центре глобуля.

В модели формирования графитного глобуля на микрокристалле лонсдейлита, при снижении "лапласовского" давления с ростом наночастицы, кристалл лонсдейлита в результате полиморфного превращения переходит в аморфный графит, который формирует центральную зону глобуля шаровидного графита.

При дальнейшей кристаллизации сплава все еще сохраняются высокие давление и температура, под воздействием которых происходит графитация аморфного углерода в центре глобуля. В результате в центре глобуля образуется структура совершенно иного графита, не имеющая ничего общего со структурой графита, сформировавшегося в процессе кристаллизации. Вполне вероятно, что это одна из форм графитированного углерода. Еще А.А. Жуков в одной из своих работ высказал предположение о наличии карбина в центре коралловидного графита в чугуне.

Твердость ядра графита центральной части глобуля значительно выше, чем твердость окружающей структуры. Согласно [5], твердость по Шору в этой части глобуля составляет 70...75 ед, в то время как твердость обыкновенного графита – 45...55 ед. При превращении фуллерита в смесь алмаз–графит [5] путем обработки фуллерита (кристаллического фуллерена) при различных температурах при давлении 12,5 ГПа удалось получить широкий спектр промежуточных модификаций углерода как фаз на основе молекул фуллерена C_{60}, так и аморфных фаз с большой долей sp^3-конфигураций, обладающих высокой твердостью ($(20...30)\cdot10^3$ HV).

Таким образом, при высоких "лапласовском" давлении и температуре происходит сближение фуллеренов C_{60}, составляющих аморфную структуру зародыша графита, образование ковалентных связей между ними и формирование одномерных и двумерных полимеризованных структурных модификаций углерода с высокой твердостью на основе фуллерена C_{60}, причем атомы углерода в аморфной сетке могут находиться как в sp^3-, так и в sp^2-конфигурациях [5].

Следовательно, полимерные структуры на основе молекул фуллерена C_{60} и аморфные модификации углерода можно рассматривать как промежуточные фазы, из которых состоит центральное гомогенное ядро шаровидного включения в процессе своего формирования при кристаллизации.

Структура дендритов графита в глобуле высокопрочного чугуна

Автором была выявлена дендритная структура графитного глобуля в высокопрочном чугуне (см. рис. 2, *г*). Измерений параметров кристалла шаровидного графита не проводили, но в работе М.П. Шебатинова показано, что толщина отдельного блока в сек-

торе глобуля составляет 20...70 нм. При этом возникает вопрос о поперечных размерах ствола "пальмы" и ветвей ее "кроны", а также вопрос о форме или геометрических параметрах дендрита графита.

Поперечные размеры можно оценить исходя из следующего. Если размер блока между ветвями 20...70 нм, то размер ветвей дендрита на рис. 2, *г*, исходя из масштаба снимка и пропорциональности, составляет около 4...8 нм.

Согласно исследованиям М. Ямомото, границами зерен в сфероидальном графите являются плоские кристаллы, т.е. фактически пластинки графита, состоящие из нескольких слоев. Ленточный графит, который обнаружил И. Минкофф (рис. 4, *а*), подтверждает данное положение. Возможность формирования ленточных структур графита показана также в работе [9].

Если "ствол" пальмы дендрита графита еще можно принять в виде пластины, то "ветвь" дендрита трудно представить в виде такой же пластины. Причем в этом случае неясен механизм образования или "отрастания" такой пластинчатой "ветви" от пластинчатого дендритного "ствола". Более того, "ветви" дендрита практически не только прямые, но и взаимно параллельны (рис. 4, *г*), т.е. они растут под строго определенным углом. Данные факты, если исходить из формы кластера коранулена, труднообъяснимы.

Возникшие противоречия в объяснении формы и механизма роста дендрита графита устраняются, если предположить, что дендритные "ветви" имеют структуру углеродных нанотрубок или наноконусов [1, 3].

Углеродные нанотрубки и наноконусы имеют диаметр от 0,6 до 30 нм при длине до 2 мкм (2000 нм) [1, 3], что соответствует порядку геометрических размеров дендрита графита.

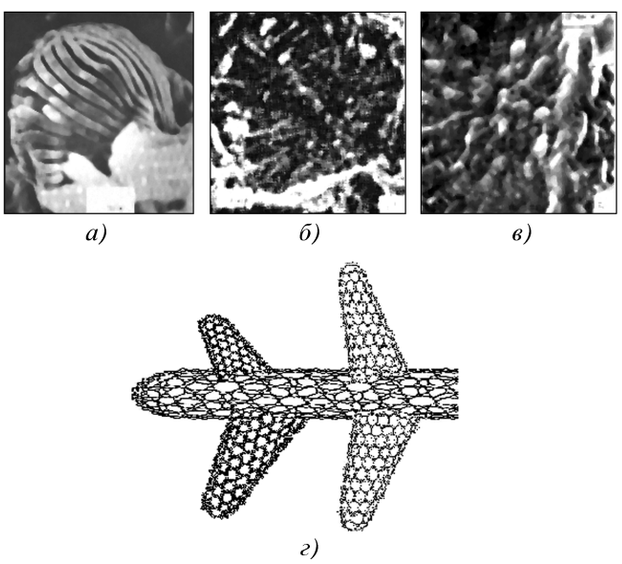


Рис. 4. Наноструктура шаровидного графитного включения: *а* – по И. Минкоффу; *б* и *в* – по М.П. Шебатинову; *г* – структура дендрита графита

В работе [3] также показано, что зародышем для нанотрубок являются половинки фуллеренов или кластеры коранулена, которые заворачиваются по механизму "улитки", причем угол поворота кластеров при формировании нанотрубки можно регулировать.

Если под определенным углом завернуты углеродные кластеры, то и все дислокационные ступеньки, располагающиеся на поверхности графитового слоя, также находятся под одним и тем же углом по отношению к центральной оси нанотрубки. Рост следующей ветви дендрита происходит классически, на базе винтовой дислокации, принадлежащей плоскости базиса, которая облегчает поворот кластеров коранулена вокруг оси ветви второго порядка формирующегося дендрита. В этом случае все ветви второго порядка будут не только прямые, но и параллельные друг другу. Следовательно, можно предположить, что дендрит графита на первоначальных этапах роста представляет собой "конструкцию" из фуллереновых трубок (см. рис. 4, *г*).

Подтверждением данных выводов являются микроструктуры включений шаровидного графита после ионного травления, полученные в работе М.П. Шебатинова (рис. 4, *б* и *в)*. После ионного травления сохраняются только "стволы" дендрита в виде цилиндрических округлых образований (нанотрубок) как в центре глобуля (рис. 4, *б*), так и на его внешней поверхности (рис. 4, *в*), напоминающие структуру "морского ежа", характерную для связок коротких углеродных нанотрубок [1, 3].

Заключение

С открытием фуллереновой структуры железоуглеродистых расплавов оказалось, что углерод способен к формированию различных полимерных структурированных образований, от плоских полициклических кластеров до объемных фуллереновых наночастиц, на любом масштабном уровне системы. Углерод обладает фактически неограниченными возможностями диссипации энергии в открытых динамически неравновесных системах различного класса с образованием адаптированных диссипативных самоорганизующихся иерархических структур на базе фуллеренов с магическими числами и других углеродных образований.

Углеродные наночастицы и фуллерены с этих позиций обладают следующими важнейшими свойствами: являются концентрированными источниками атомов углерода, которые "консервируются" в расплаве; представляют собой гомогенные центры кристаллизации графита; адсорбируясь на поверхности неметаллических включений при кристаллизации, превращают эти включения в активированные гетерогенные центры графитизации.

Исходя из новых положений, жидкий чугун следует рассматривать как однофазную систему, которая является углеродно-железистым полимером, струк-

турными базовыми элементами которого являются фуллерены (прежде всего кластеры C_{20} и C_{60}) и углеродные наночастицы на их основе.

Следовательно, открытие фуллереновой природы жидкого чугуна или нанометрической структуры жидкого чугуна дает возможность рассмотрения как механизмов кристаллизации графита, так и оценки процессов модифицирования чугунов на основе принципиально новых подходов.

В работе [10] рассмотрены основы технологии наномодифицирования чугунов, которая заключается в модифицирующей обработке расплава чугуна различными поверхностно-активными элементами (ПАЭ), что открывает новые аспекты воздействия на фуллереновую наноструктурную основу расплава чугуна и управление через это воздействие процессами структурообразования в графитизированных чугунах при их кристаллизации. В процессе модифицирования в расплаве образуются искусственные углеродные наносоединения на основе фуллеренов и ПАЭ, которые активно изменяют характер кристаллизации железоуглеродистых расплавов. Такой метод воздействия на структуру железоуглеродистых расплавов получил название "наномодифицирование" [10]. Наномодифицирование есть направленное изменение текущего структурного состояния расплава на данном масштабном уровне системы (расплав чугуна) для целенаправленного регулирования его структурной самоорганизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Харрис П.** Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера, 2003. 336 с.

2. **Жуков А.А.** Фуллерены и сфероидизация графита в сплавах железа // Металловедение и термическая обработка металлов. 2000. № 7. С. 3–6.

3. **Лозовик Ю.А., Попов А.М.** Образование и рост углеродных наноструктур – фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 7. С. 751–774.

4. **Полиморфные** модификации углерода и нитрида бора / А.В. Курдюмов, В.Г. Малоголовец, Н.В. Новиков и др. М.: Металлургия, 1994. 318 с.

5. **Бражкин В.В., Ляпин А.Г.** Превращение фуллерита C_{60} при высоких давлениях и температурах // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 8. С. 893–897.

6. **Домрачев Г.А., Лазарев А.И., Каверин Б.С. и др.** Роль углерода и металла в самоорганизации системы железо–углерод при различных содержаниях компонентов // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 10. С. 1901–1915.

7. **Бунина Н.В., Петраковская Э.А., Марачевский А.В. и др.** Синтез и исследование железофуллереновых кластеров // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. Вып. 5. С. 952–954.

8. **Давыдов И.В., Подливаев А.И., Опенов Л.А.** Аномальная термическая устойчивость метастабильного фуллерена C_{20} // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 4. С. 751–757.

9. **Евтеев А.В., Косилов А.Т., Левченко Е.В., Логачев О.Б.** Кинетика изотермической нуклеации в переохлажденном расплаве железа // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. Вып. 5. С. 769–774.

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

Сергей Васильевич Давыдов, д-р техн. наук

Г.Н. Миненко *(МГТУ "МАМИ")*

Воздействие гидродинамического состояния металлического расплава на условия растворения модификатора

Рассмотрено влияние гидродинамической обстановки в расплаве чугуна на изменение условий растворения модификатора. Приведены зависимости механических свойств модифицированного чугуна от скорости протекания жидкого чугуна через камеру модифицирования и его обработки электрическим током. Даны результаты изменения степени усвоения чугуном кремния под влиянием скорости протекания расплава.

The paper considers the influence of hydrodynamical conditions in iron melt on change of modifier solution. Dependences of inoculated cast iron mechanical properties on liquid iron speed of course and his treatment by an electric current are described. Results of iron modifier's degree of recovery change on silicon under influence of iron melt course speed through the chamber for modifying are given.

Создание оптимальных условий растворения частиц модификатора является технической проблемой, решение которой имеет большое практическое и экономическое значение. На процесс растворения модификатора в металлическом расплаве влияют следующие основные факторы: температура и химический состав жидкого чугуна; химический состав и процент ввода модификатора; размер частиц модификатора;

размер емкости, где проводится модифицирование; гидродинамическая обстановка в расплаве чугуна с введенными в него частицами модификатора и воздействие на расплав чугуна внешнего физического поля.

Для определения влияния на процесс модифицирования условий растворения частиц модификатора была использована специальная экспериментальная установка. Данная установка позволяла изменять гидродинамическую обстановку в расплаве чугуна за счет варьирования скорости протекания расплава чугуна через камеру модифицирования.

Скорость потока жидкого чугуна через камеру модифицирования меняли за счет одновременного увеличения или уменьшения диаметров выпускных отверстий *D* промежуточной воронки и камеры модифицирования (рис. 1).

Промежуточная воронка *2* изготавливалась из стержневой смеси с выпускным отверстием диаметром, 10, 15, 20 и 25 мм. Она располагалась над камерой для модифицирования *3* на высоте *H*, равной 30 мм. Камера для модифицирования также выполнялась из стержневой смеси [1] и имела выпускное отверстие *D* со значениями диаметра, равными 10, 15, 20, 25 мм, и находилась над литейной формой *4* на расстоянии *H*, равном 30 мм.

Опыты по определению влияния условий растворения частиц модификатора на результаты процесса модифицирования проводили в определенной последовательности. Жидкий чугун переливался из ковша (см. рис. 1) в промежуточную воронку *2*. В камере для модифицирования *3* находился карман *1* с помещенными в него частицами модификатора заданного размера. Струя жидкого чугуна была направлена на дно камеры между карманом с модификатором и порогом, через который расплав чугуна переливался в литейную форму *4* для получения образцов на механические испытания. Опыты проводились с использованием одного из размеров (10, 15, 20 или 25 мм) диаметра *D* выпускных отверстий промежуточной воронки и камеры для модифицирования.

В экспериментах использовали серый чугун индукционной плавки, выплавляемый в ИСТ-0,16 с кислой футеровкой. Исходный чугун имел следующий химический состав: 2,7...2,9 % C; 1,3...1,6 % Si; 0,5...0,8 % Mn; P, S и Cr не более 0,1 %. Температуру жидкого чугуна измеряли термопарой ВР-5/20 и она составляла (1420±10) °С. В качестве модификатора применяли СММ, который имел размер частиц 3...5 мм и состав: РЗМ – 31,0 %; Ce – 9,0 %; Al – 3,3 %; Ca – 1,2 %; Si – 46,3 %. Данный модификатор закладывали в карман камеры для модифицирования в количестве 0,3 % от массы чугуна.

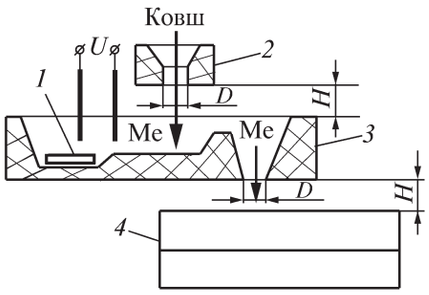


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

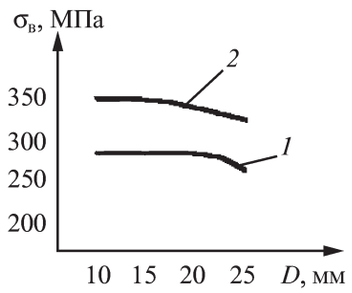
При использовании кремнийсодержащего модификатора СММ результаты опытов показали, что при одновременном изменении размеров *D* выпускных отверстий промежуточной воронки и камеры для модифицирования с 25 на 20 мм происходит увеличение степени усвоения модификатора по кремнию с 79,1 до 82,5 %. Уменьшение диаметра *D* до 15 мм промежуточной воронки и камеры для модифицирования также повышало степень усвоения до 84,3 %.

Для диаметров *D*, равных 10 мм, увеличение степени усвоения модификатора не превысило значений этой величины для диаметра 15 мм в пределах средней абсолютной погрешности измерения (0,22 %). Это свидетельствует о том, что фактор влияния повышения скорости потока жидкого чугуна при уменьшении диаметров *D* имеет ограниченное значение, так как при переходе диаметра *D* с 25 на 15 мм степень усвоения модификатора чугуном увеличивается, а при диаметре меньшем 15 мм степень усвоения не изменяется.

Для определения влияния обработки электрическим током на процесс растворения модификатора использовали электроды, установленные в камере для модифицирования, к которым подводилось напряжение *U* (см. рис. 1). Режим обработки был выбран исходя из результатов специальных экспериментов [2] и равен: время обработки 60 с, плотность тока 0,74 А/см^2. Опыты показали, что применение обработки электрическим током повышает степень усвоения модификатора по кремнию при использовании указанных выше размеров диаметров *D* промежуточной воронки и камеры для модифицирования. Так, при уменьшении диаметров *D* с 25 до 10 мм степень усвоения модификатора после обработки током повышалась с 80,3 до 89,5 %.

Механические свойства модифицированного серого чугуна также изменились под влиянием обработки током (рис. 2). При этом предел прочности при

Рис. 2. Изменение предела прочности чугуна при растяжении в зависимости от диаметра выпускного отверстия промежуточной воронки и камеры для модифицирования (*1*) и под влиянием обработки электрическим током (*2*)



растяжении обработанного током чугуна (кривая *2*) превышал при всех значениях диаметров *D* промежуточной воронки и камеры для модифицирования прочность необработанного, модифицированного чугуна (кривая *1*). Относительная погрешность измерения предела прочности чугуна составила 4,86 %.

Такое позитивное воздействие электрического тока на результаты процесса модифицирования можно объяснить выделением в межэлектродном пространстве установленных в камере для модифицирования электродов, джоулевой теплоты, интенсифицирующей тепловые конвективные потоки в расплаве. Это приводит к изменению условий растворения модификатора и повышает степень его усвоения. Более полное усвоение жидким чугуном модификатора положительно влияет на рост прочностных свойств модифицированного серого чугуна.

Таким образом, увеличение скорости потока жидкого чугуна, протекающего через камеру для модифицирования, имеет ограничения по своему влиянию на процесс растворения и усвоения модификатора расплавом чугуна. Воздействие электрического тока на расплав чугуна приводит к дополнительному конвективному перемешиванию жидкого чугуна и повышает степень усвоения модификатора. Такое изменение степени усвоения модификатора снижает его расход, положительно влияет на процесс кристаллизации чугуна и повышает его механические свойства. Рост механических свойств модифицированного чугуна вызывает уменьшение процента брака чугунных отливок по механическим свойствам и снижение себестоимости литых заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Миненко Г.Н.** Особенности процесса растворения и усвоения чугуном кремнийсодержащих модификаторов // Литейное производство. 1992. № 10. С. 11–12.

2. **Миненко Г.Н., Белов В.А., Сухарчук Ю.С.** Повышение механических свойств железоуглеродистых сплавов обработкой электрическим током в процессе модифицирования // Автомобильное производство. 1985. № 10. С. 2–4.

Георгий Николаевич Миненко, канд. техн. наук

С.С. Жуковский, А.Г. Коршаков *(ООО "Уралхимпласт–Кавенаги")*

Синтетические литейные связующие для новых технологических процессов

Приведены номенклатура и технологические характеристики синтетических связующих для холоднотвердеющих смесей, а также материалы для группы современных процессов ("Cold-box-amine"-процесс, "MF-процесс", "Epoxy – SO_2", "Resol – CO_2"-процесс и др.), применяемых в массовом и серийном производстве отливок из чугуна, стали и цветных сплавов.

The nomenclature and technological characteristics of synthetic binders for cold-harden mixes, and also materials for group of modern processes ("Cold-box-amine"-process, "MF-process", "Epoxy – SO_2", "Resol – CO_2"-process et al.), used in repetition batch work castings from iron, steel and nonferrous alloys are resulted.

В мировом литейном производстве лидирующее положение занимают процессы изготовления стержней и форм из холоднотвердеющих смесей (ХТС), используемых для производства отливок из чугуна, стали и цветных сплавов. Западными фирмами разработан ряд связующих композиций и, соответственно, технологических процессов с различными технологическими показателями. Выбирая один из них при создании нового производства или модернизации действующего, руководствуются такими параметрами, как прочностные свойства, техника и скорость отверждения, живучесть, поведение при контакте с металлом, экологические и экономические характеристики. В России поставщиком синтетических связующих более чем для 100 предприятий является российско-итальянская компания "Уралхимпласт–Кавенаги" в Нижнем Тагиле. Ее продукция соответствует европейскому техническому уровню, поставляется региональными центрами, обеспечивается техническим сервисом при освоении и решении возникающих технологических вопросов.

Для массового и крупносерийного производства стержней, особенно в автомобильной и тракторной промышленности, транспортном машиностроении широкое применение получили нижеперечисленные процессы, основанные на отверждении смесей газообразными реагентами.

1. ХТС на базе фенольно-изоцианатного связующего с продувкой третичным амином – "Cold-box-amine"-процесс.

2. ХТС на базе специального фенольного связующего с продувкой парами метилформиата – "MF-процесс" или процесс "Бета-сет".

3. ХТС с эпоксиакрилатным или фурановым связующим, отверждаемые продувкой SO_2 ("Epoxy-SO_2" или "Furan-SO_2").

4. ХТС на базе специального фенольного связующего с продувкой углекислым газом – "Resol – CO_2"-процесс.

5. "CO_2-процесс" на основе ХТС с жидким стеклом.

Процесс "Cold-box-amine" – универсальный по геометрии стержней и сплавам применительно к условиям массового и крупносерийного производства. В практике зарубежных литейных цехов развитых стран он является основным. Ведущие производители литейного оборудования в ФРГ, США, Италии поставляют для него стержневые комплексы. В их состав входят стержневые машины с встроенными смесителями, газогенераторы, нейтрализаторы, для некоторых производств – оборудование для окраски стержней водными красками и подсушки. На заводах России эта технология в последние годы широко внедряется для чугунного и алюминиевого литья (заводы "Промтрактор-Промлит, Чебоксарский агрегатный, Заволжский моторный и др.).

Указанный процесс изготовления стержней "по холодным ящикам" основан на способности полиуретановой связующей композиции отверждаться при продувке газообразным отвердителем. В качестве отвердителей применяются амины (триметиламин или диметилэтиламин). Стержневой ящик, заполненный песчано-смоляной смесью, при комнатной температуре продувается отвердителем в течение нескольких секунд, а затем воздухом в целях очистки от амина. Избыток газа и смесь газа с воздухом поступают в нейтрализатор. Находящаяся в ящике стержневая смесь затвердевает по всему объему и набирает не менее 80 % окончательной прочности, что позволяет извлекать из ящика ажурные и точные стержни, безупречно повторяющие геометрию полости стержневого ящика. Как правило, сложные наборы комплектов стержней для отливки блока цилиндров двигателя легкового автомобиля имеют отклонения от чертежных размеров, не превышающие 0,3 мм.

Процесс "Cold-box-amine" дает возможность коренным образом улучшить условия труда в стержневом отделении чугунолитейного цеха и экологическую ситуацию вокруг цеха. Улучшение условий труда обеспечивается организацией отсоса газа-отвердителя непосредственно от стержневого ящика в нейтрализатор, практическим отсутствием выделения вредных газов из готового стержня, а также тем, что процесс осуществляется без нагрева стержневого ящика и сопутствующего нагреву выделения токсичных продуктов. Оператор стержневой машины работает в более комфортных, по сравнению с горячим процессом, условиях.

Следует особо подчеркнуть, что ни одно производство автомобильных отливок на современном уровне, а также выпуск перспективных моделей автомобилей и двигателей невозможны без использования технологии изготовления стержней "по холодным ящикам". Ее применение необходимо также для конкурентоспособного производства отливок на экспорт и является обязательным для международной сертификации литейных производств.

Помимо указанных преимуществ, процесс изготовления стержней "Cold-box-amine" дает значительный экономический эффект.

Заводы России и СНГ используют связующее "Резамин СВ" ("GIOCA CB") – здесь и далее первое название связующего – это российский товарный знак, второе в скобках – итальянский товарный знак. Это связующее, поставляемое ООО "Уралхимпласт–Кавенаги", дает начальную прочность 0,8...1,0 МПа при суммарном содержании двух компонентов 0,9...1,6 мас.ч.

Достаточно высокие требования в этом случае предъявляются к песку по химическому составу и содержанию глинистой составляющей; оптимальным является песок марок 1К02, 1К0315. Другие технические особенности изложены в информационных материалах производителя, возникающие проблемы решаются службой сервиса нашей компании.

"MF-процесс" или процесс "Бета-сет" характеризуется высокой термостойкостью связующего и поэтому пригоден больше всего для стального литья. Однако прочность отвержденной смеси несколько ниже, чем при процессе "Cold-box-amine"; "Бета-сет" приемлем для стержней относительно простой конфигурации. Связующим для него является резольная фенолоформальдегидная смола "Алкасет NB" ("Alkafen CB"). Для отверждения путем продувки используется газообразный метилформиат (метиловый эфир муравьиной кислоты) $HCOO–CH_3$. В состав смеси входит 1,0...2,0 мас.ч. (или 0,7...1,0 мас.ч. для смеси на основе циркона либо хромита) связующего на 100 мас.ч. кварцевого песка.

Оптимальные прочностные свойства получаются при использовании кварцевого песка марки 1К02 при влажности не более 0,5...1,0 %. Оптимальная температура песка – 18...30 °С. Время продувки стержня составляет 20...30 с, специальных средств для нейтрализации метилформиата не требуется.

Теоретически расход эфира – 20 % от массы связующего. Фактически он бывает выше, так как зависит от конфигурации стержня, вентиляции ящика, качества уплотнения по разъему. Реальный расход метилформиата – 20...40 % от массы связующего.

Метилформиат является не катализатором, а реактивным компонентом механизма отверждения. Превышение его теоретического расхода не влияет на скорость и конечный уровень упрочнения. Скорость зависит от распределения метилформиата в объеме стержня или формы, а также от соответствия количества газа размеру стержня и его конфигурации. Расход

его должен быть минимум 20 % от массы связующего, в противном случае возможно недоотверждение. На мелких стержнях недостатки могут проявляться в пониженной поверхностной прочности, сокращении времени их хранения.

После продувки смеси метилформиатом под давлением 0,2...0,3 МПа производится ее очистка сжатым воздухом под давлением 0,3...0,4 МПа в течение 10...15 с. Это требуется для удаления из системы горючей газовой смеси и, в особенности для крупных стержней, дополнительного распределения отвердителя в объеме смеси.

Прочностные свойства смеси для "Бета-сет" в отличие от других типов ХТС мало зависят от влажности песка и содержания в нем оксидов щелочных и щелочно-земельных металлов, а также от влажности воздуха при хранении стержней. В табл. 1 приведены технологические свойства смеси.

При использовании самовысыхающих спиртовых покрытий окраску можно производить сразу после затвердевания. Далее покрытие либо поджигается, либо выдерживается на воздухе 1...1,5 ч до полного высыхания.

ХТС с эпоксиакрилатным связующим, отверждаемые продувкой SO_2 ("Ероху–SO_2"), в настоящее время в России применяют на одном предприятии – "КАМАЗ-Металлургия". Связующее представляет собой смесь двух компонентов, условно обозначаемых как компонент А – смесь эпоксидно-диановой смолы и полуфункционального акрилата, и компонент Б – смесь эпоксидно-диановой смолы и окислителя. Связующее отверждается газообразным сернистым ангидридом SO_2, предназначено для производства отливок из алюминия, чугуна, стали; при высоких скоростях заливки чугуна или стали необходимо применять противопригарные покрытия, защищающие смесь от эрозии.

Обычное содержание связующего в смеси 1,3...1,5 мас.ч. при соотношении компонентов от 50:50 до 60:40 в зависимости от вида сплава и требований по качеству отливок и выбиваемости.

Для смесей данного типа возможно применение не только кварцевого песка, но и цирконового, оливинового, хромитового. Рекомендуемая температура песка 15...40 °С.

Потери при прокаливании регенерированного песка не должны превышать 1,5 %. Связующее данного типа, производимое ООО "Уралхимпласт–Кавенаги" – "Эпакрил" ("Eposet").

1. Технологические свойства смесей для процесса "Бета-сет"

Содержание связующего, мас.ч.	Прочность на разрыв, МПа, после выдержки			Живучесть, ч	Газотворная способность, $см^3/г$
	30 с	1 ч	24 ч		
1,5	0,7...0,8	0,8...1,0	1,0...1,2	8	4...5
1,8	0,8...1,0	1,0...1,2	1,2...1,4	8	7...8

2. Физико-химические показатели эпоксиакрилатного связующего

Плотность, $кг/м^3$	Компонент А – 1100...1200 Компонент Б – 1080...1180
Условная вязкость при температуре 20 °С, с, не более	Компонент А – 450 Компонент Б – 150
Массовая доля окислителя (гидропероксида изопропилбензола) в компоненте Б, %	30...40
Предел прочности на разрыв после продувки сернистым ангидридом, МПа, не менее, после выдержки: 1 мин 1 ч 3 ч 24 ч	 0,6 1,3 1,5 1,5
Текучесть смеси, %, не менее	70

По физико-химическим показателям типичное связующее соответствует требованиям, указанным в табл. 2.

Для толстостенных отливок из черных сплавов с помощью специальных добавок можно несколько повысить термостойкость связующего. Это могут быть акриловые или виниловые мономеры, фуриловый спирт, полифуриловый спирт, фенолоформальдегидные смолы горячего отверждения, уретановые смолы и их смеси.

Стержневые ящики могут быть выполнены из дерева, металла, пластмассы. Смесь легко выбивается из алюминиевых отливок, что повышает производительность и снижает вероятность повреждения отливок при выбивке. Живучесть смеси превышает 96 ч.

В табл. 3 даны средние прочностные показатели отечественных и зарубежных смол.

Высокая текучесть смеси позволяет использовать пониженные давления при машинном уплотнении. Давление наддува должно быть от 0,2 до 0,35 МПа. Воздух в процессе должен быть сухим, иметь при атмосферном давлении точку росы от –20 до –40 °С. Наличие в воздухе и песке влаги снижает прочность.

ХТС на базе специального связующего – щелочной конденсированной фенолоформальдегидной смолы с продувкой углекислым газом – называется "Resol – CO_2"-процесс.

3. Прочность смесей для процесса "Ероху–SO_2"

Связующее	Прочность на разрыв, МПа, после выдержки			
	1 мин	1 ч	3 ч	24 ч
Российское	0,66	1,0	1,0	1,35
Зарубежное	0,57	1,0	1,15	1,25

Связующее отверждается углекислым газом, предназначено для серийного и единичного производства. Коммерческая марка российского связующего "Резофен СВ".

При продувке смеси углекислым газом pH переходит в кислую область; в этот период происходит формирование начальной прочности. Это достаточное условие для извлечения стержня из оснастки. Дальнейший рост прочности происходит при хранении стержней на воздухе. При этом присутствующий в стержне и воздухе CO_2 реагирует с остатком связующего.

Смесь содержит 2...3 мас.ч. связующего, расход CO_2 при продувке 200...300 л/мин – 10 л на 1 кг смеси, относительное давление 0,02...0,06 МПа, температура газа 20...40 °С, время продувки 20 с. Песок должен иметь 6,5...7,5 pH, смолу нельзя смешивать с кислотами или кислыми солями, это приводит к "отравлению" и интенсивному тепловыделению. Прочность при изгибе сразу после продувки составляет 0,7...1,0 МПа; через 15 мин – 1,2...1,5 МПа; через 1 ч – 1,4...1,6 МПа. При выдержке образцов в течение 24 ч при влажности 95 % прочность – 2,3...2,5 МПа.

Значительный рост прочности происходит при подсушивании в конвективном сушиле или с помощью СВЧ. При этом прочность возрастает в 1,5–2 раза, растет и поверхностная прочность.

Связующее не содержит азота, серы, фосфора, содержание свободного фенола и формальдегида не выше 0,1...0,2 %, отсутствуют такие дефекты, как "блестящий углерод", ситовидная пористость, просечки, трещины при стальном литье, незначительны холодная и горячая эмиссия, улучшаются условия труда рабочих, так как при переработке смеси нет запаха. Для стержней могут применяться как водные, так и спиртовые краски. На финишной стадии уменьшаются расходы на обрубку и выбивку.

Для приготовления стержневой или формовочной смеси рекомендуется применять сухой кварцевый песок с массовой долей глинистой составляющей не более 0,5...1,0 %, массовой долей диоксида кремния не менее 97...98 %, коэффициентом однородности О3 от 60 до 70, средним размером зерна 0,19...0,23 мм. При превышении глинистой составляющей, изменении группы песка по среднему размеру состав смеси подлежит корректировке. Снижение содержания диоксида кремния в песке ниже 98 % при изготовлении среднего и крупного стального литья не рекомендуется из-за опасности образования пригара.

Содержание влаги в песке перед подачей его в смеситель не должно превышать 0,1...0,2 %, температура песка – не выше 20...25 °С. При более высокой температуре снижается живучесть смеси.

Все основные наполнители (кварц, циркон, хромит, шамот) для смесей приемлемы. Они должны быть отмыты, высушены и классифицированы.

При испытании в моносистеме может быть до 20 % регенерата. В двойных системах также рекомендуется до 20 % регенерата "от горячих ящиков", от 10 % "Cold-box", "Crining-процесса".

Время перемешивания составляет 1...2 мин. При более длительном перемешивании снижается живучесть смеси за счет поглощения углекислого газа из воздуха. Готовая смесь имеет живучесть несколько часов, но хранить ее желательно закрытой влажной тканью, пленкой или в закрытой емкости. Возможна реализация процесса при пониженных температурах, однако это требует уточнения состава и режима продувки применительно к конкретным условиям.

Уплотнение производится вручную, на вибростоле или на пескострельной машине. Наиболее эффективно сочетание машинного уплотнения с продувкой углекислым газом непосредственно в машине. Для этого желательно предусмотреть соответствующую вентиляцию оснастки и устройство для подачи и дозирования углекислого газа. Текучесть смеси несколько хуже, чем, например смеси для процесса "Cold-box-amine", поэтому должны быть несколько увеличены площадь вент и давление наддува.

Нужно иметь в виду, что газ проходит через смесь с относительно низкой скоростью. Оптимальное время продувки составляет 30...60 с. Необходимо отверстие (одно или несколько) для продувки расположить так, чтобы углекислый газ равномерно проходил через смесь.

Для изготовления стержней пригодна деревянная, стальная или чугунная оснастка. При использовании алюминиевой оснастки необходимо применять распределительное покрытие, так как щелочное связующее реагирует с алюминием и смесь прилипает. Рабочая поверхность стержневых ящиков или моделей должна быть гладкой, без шероховатостей и дефектов. Должны быть выполнены уклоны вертикальных стенок для более легкого извлечения стержней.

Оптимальным для данной технологии является изготовление стержневых ящиков (особенно алюминиевых), в конструкции которых исключается протяжка стержня по вертикальным поверхностям. Возможна, а в некоторых случаях необходима, окраска стержней или водной, или самовысыхающей противопригарной краской. Предпочтительно применение самовысыхающих красок, так как водная краска может привести к разупрочнению поверхностного слоя стержня. При окраске водной краской ее затем следует подсушивать при температуре 120...150 °С в течение 20...40 мин.

В серийном и индивидуальном производстве часто используют три типа связующих для самотвердеющих смесей: фурановые, карбамидофурановые и фенолофурановые смолы. Традиционно применяют связующие, содержащие фуриловый спирт или синтезированные на базе фурилового спирта (чисто фурановые). К ним относятся смолы типа КФ и ФФ (КФ-65С; ФФ-65С). Фурановые смолы типа "Резоформ NB" получают в присутствии малеинового ангидрида.

В качестве катализаторов для смол этого типа применяют водные растворы ортофосфорной кислоты, а также водные или водно-спиртовые растворы сульфокислот – паратолуолсульфокислоты (ПТСК), или бензолсульфокислоты (БСК), или их смеси с серной либо ортофосфорной кислотой.

4. Характеристики смол "Резоформ ФК-1" и "Резоформ ФК-9"

Марка смолы	Массовая доля азота, %	Прочность на разрыв, МПа, через 30 мин/1 ч/3 ч/24 ч
"Резоформ ФК1"	Не более 0,5	0,3/0,7/1,2/1,5
"Резоформ ФК-9"	–	0,2/0,2/1,2/1,5

Чисто фурановые смолы обладают высокой прочностью и термостойкостью, применяются для изготовления стержней и форм крупного стального и чугунного литья, в том числе для безопочной формовки. Смолы такого типа выпускаются фирмой "Уралхимпласт–Кавенаги" (табл. 4).

Карбамидофурановые и фенолофурановые смолы имеют наибольшее применение в составе ХТС как в отечественной, так и в мировой практике. Они дают широкий спектр технологических возможностей в зависимости от соотношения карбамидоформальдегидного и фуранового компонентов. Реакционная способность, прочность и термостойкость этих компонентов различны, поэтому свойства ХТС с ними зависят от соотношения мономеров в синтезе, способа синтеза и стабилизации готового продукта, свойств применяемого катализатора и состава смеси.

Характеристики карбамидофурановых и фенолофурановых смол, поставляемых ООО "Уралхимпласт–Кавенаги", приведены в табл. 5.

Содержание смол в смесях 0,6...1,5 мас.ч., катализаторов – 30...70 % от массы смолы, но не выше 70 % и не ниже 30 %. Время до извлечения модели или стержня изменяется за счет соотношения смола – катализатор в интервале 15...40 мин. Содержание фурилового спирта существенно влияет не только на прочность стержней и форм, но и на термостойкость смесей. Поэтому в зарубежной практике применяют смолы с высоким содержанием фурилового спирта. Преимущественно это относится к смесям для средних и крупных форм при безопочной формовке.

Для процесса "Альфа-сет" связующее представляет собой композицию, состоящую из двух компонентов: высокощелочной фенолоформальдегидной смолы и катализатора (смеси эфиров). Основным производителем этой связующей композиции является ООО "Уралхимпласт–Кавенаги"; в ее состав входят связующее "Алкасет NB" ("Alcafen") и группа отвердителей "Каталит" ("Alcadur"). Отвердители обеспечивают различную живучесть смесей – от 5 до 30...40 мин и, соответственно, различную продолжительность упрочнения.

Прочность смесей на разрыв при содержании смолы 2...2,5 мас.ч. и отвердителя 0,4...0,5 мас.ч. составляет через 30 мин 0,2...0,3 МПа, через 1 ч – 0,4...0,6 МПа и через 24 ч – 0,8...1,0 МПа.

Преимущества технологии этого типа: меньше газовыделение при заливке, легкое отделение от оснастки, хорошее качество при финишных операциях, отсутствие азота, фосфора, серы.

Наибольшее развитие она получила при производстве стального литья (особенно отливок из марганцовистых сталей), а в дальнейшем также отливок из чугуна и цветных сплавов. При стальном литье значительно улучшилось качество отливок, снизилась трудоемкость финишной обработки. Характерно уменьшение дефектов расширения, таких как просечки и пригар; химическая природа связующего позволяет компенсировать первоначальное расширение кварца при литье до окончательного затвердевания связующего. Низкое содержание азота и отсутствие серы, фосфора минимизируют газовые и металлургические дефекты без добавления оксидов железа.

Положительные результаты дает механическая и термическая регенерация эфирно-фенольной смеси. Типичное содержание смолы в смеси – 1,5...1,8 мас.ч., отвердителя – 0,3...0,4 мас.ч.

Отвердителями являются смеси органических эфиров. Эфиры – это метилформиат, этилформиат, этилацетат, этиллактат, бутиролактон, капролактон, моноацетат этиленгликоля или диацетин.

Для ХТС можно применять кварц, хромит, циркон, оливин. Оба компонента связующей композиции водорастворимы.

Развивается применение самотвердеющей ХТС на базе фенольно-изоцианатного связующего, отверждаемого жидким амином (пиридиновым производным) – "Резамин NB" ("Rapidur"). Этот процесс называют "Pep-set". Смесь используется для стержней и форм среднего и крупного стального и чугунного литья. Ее принципиальное отличие состоит в том, что после завершения времени живучести происходит быстрый рост прочности. Таким образом, в отличие от ХТС, отверждаемых кислотами, необходимая по условиям производства большая живучесть не задерживает выполнение последующих технологических операций.

5. Характеристики карбамидофурановых и фенолофурановых смол

Марка смолы	Содержание в смеси, мас.ч.	Катализатор	Содержание в смеси, мас.ч.	Прочность на разрыв, МПа		Живучесть, мин
				через 1 ч	через 24 ч	
БС-40	1,8...2,0	H_3PO_4	0,6...0,8	0,15...0,2	0,8...1,2	5...10
КФ-65С	1,0...1,2	H_3PO_4	0,6...0,8	0,2...0,3	1,0...1,4	6...10
ФФ-65С	1,0...1,2	ПТСК или БСК	1,2...1,6	0,4...0,6	0,8...1,0	2...3
ФФ-1Ф	2,0...2,5	ПТСК или БСК	0,5...0,6	> 0,15	> 0,7	5...10

Сергей Семёнович Жуковский, д-р техн. наук; Александр Геннадьевич Коршаков, генеральный директор

В.В. Карабанов *(г. Железнодорожный)*

Эрозионно-растворный процесс при пайке*

Показано, что эрозионно-растворный процесс при пайке обеспечивает более быстрое и равномерное насыщение жидкого припоя в паяльном зазоре элементами паяемого металла и может быть использован как наиболее эффективное средство управления составом и свойствами паяного шва.

It is shown that erosive-soluble process at the soldering provide for faster and uniform saturation of liquid solder in hot clearance with elements soldered metal and can be used as the most effective control means structure and properties soldered seam.

Существующая теория пайки основана на рассмотрении закономерности растворно-диффузионного процесса, протекающего на границе контактирования паяемого металла и расплава припоя, при котором происходит массообмен между взаимодействующими металлами. Интенсивность проникновения атомов одного металла в другой и его распространение определяются законами атомарной диффузии и физико-химическими свойствами взаимодействующих металлов. Знание этих закономерностей позволяет прогнозировать структуру и свойства паяного шва.

Такое понимание процесса формирования паяного шва оправдано при стационарном (неподвижном) состоянии припоя в шве, что обеспечивается в случае внесения его между паяемыми поверхностями при сборке соединения под пайку.

Между тем в большинстве случаев капиллярная пайка проводится с затеканием расплава припоя в паяльный зазор. По мере продвижения припоя в зазоре он быстро обогащается элементами паяемого металла, что может привести к его изотермической кристаллизации в зазоре. Процесс затекания припоя в зазор предусмотрен в определении процесса пайки, приведенном в ГОСТ 17325–79. Поэтому применяемые при исследованиях методы оценки структуры и твердости паяного шва по отдельному его участку являются недостаточными, так как структура и свойства паяного шва на участках входа и выхода припоя в зазоре могут существенно различаться.

Разрушающее действие эрозионно-растворного процесса, возникающего при подвижном состоянии припоя, и интенсивность насыщения его элементами паяемого металла несопоставимы с действием растворно-диффузионного процесса, протекающего при стационарном состоянии расплава припоя в зазоре.

В случае если припой и паяемый металл образуют твердые растворы, то в паяльном зазоре может происходить изотермическая кристаллизация переходного слоя или фронтальной части движущегося припоя. При ограниченной их растворимости расплав припоя активно диспергирует паяемый металл.

В подвижное состояние расплав припоя в зазоре, кроме капиллярных сил, приводят силы тяжести, электромагнитные силы, возникающие при индукционной пайке, и силы атомных диффузионных потоков от поверхности паяемого металла. Последние возникают при стационарном состоянии расплава припоя в зазоре.

Перемещение расплава припоя диффузионным атомным потоком можно наблюдать при автовакуумной пайке стальных изделий с широкими паяльными зазорами, заполненными стальным порошком с использованием в качестве припоя латуни, не образующей с железом твердых растворов. Проникая в структурные несовершенства паяемого металла, расплав латуни или ликвирующая из нее медь снижают свободную поверхностную энергию зерен или частиц металла и расклинивают их, отделяя от поверхности.

Вместе с тем диффузионный атомный поток от паяемой поверхности приводит в движение расплав припоя по пути перемещения, который относит диспергированные частицы паяемого металла в глубь расплава. В процессе нагрева и охлаждения диспергированные частицы служат подложкой для присоединения диффундирующих атомов паяемого металла, вследствие чего отмечается рост их размеров.

Подобный естественный эрозионный процесс наблюдается при пайке медью.

Естественный эрозионный процесс в паяльном зазоре очень длителен и действия его можно наблюдать только после выдержки температуры пайки в течение 300...3600 с. Для активации процесса повышают температуру пайки или увеличивают длительность выдержки.

Этот процесс используют для улучшения структуры и свойств паяного шва [1]. Металл шва с железным наполнителем, имеющим размеры частиц 0,2...0,5 мм, имеет низкие механические свойства. Для их повышения состав наполнителя и припоя подбирают таким образом, чтобы при температуре пайки, выдерживаемой более часа, расплавленный припой распределял их по всему объему и диспергировал до размеров

* В порядке обсуждения.

5...20 мкм. При этом они приобретают преимущественно сфероидальную форму. Образующийся композиционный металл шва представляет собой матрицу твердого раствора, армированного мелкодисперсными частицами наполнителя, в качестве которого применяют порошок или смесь порошков на железоникелевой основе.

Неподвижный расплав зоны сплавления насыщается диспергированными частицами паяемого металла как и диффундирующими атомами по экспоненциальному закону, поэтому результаты естественного эрозионного процесса проявляются после длительной выдержки температуры пайки при узких зазорах.

При динамическом состоянии расплав припоя активно разрушает паяемый металл в процессе своего движения и насыщается им по всему объему независимо от величины паяльного зазора. В этом отношении показательны результаты экспериментальной пайки в среде аргона телескопического соединения вала диаметром 50 мм из стали 36Г2С и втулки высотой 40 мм из стали 20. Между деталями устанавливали широкие зазоры до 3 мм. Применяли припой на медно-марганцевой основе П65, не образующий с железом твердых растворов.

Пайку образца проводили в контейнере в вертикальном положении, снизу зазор герметизировали стеклозамазкой. Над зазором на узком участке прикрепляли козырек с паяльной смесью припоя и флюса.

При достижении температуры пайки образующийся в козырьке расплав припоя на локальном участке стекал в основание зазора и заполнял его по окружности. Заполнение всего зазора происходило путем поднятия уровня припоя на всю высоту зазора. Выдержку при температуре пайки не проводили.

Металлографические исследования полученных широких паяных швов показали, что при заполнении припоем зазора происходила активная эрозия паяемого металла с отрывом целых групп зерен (рис. 1), переносом их в расплав припоя и растворением в нем одновременно по всей ширине зазора. Паяные швы

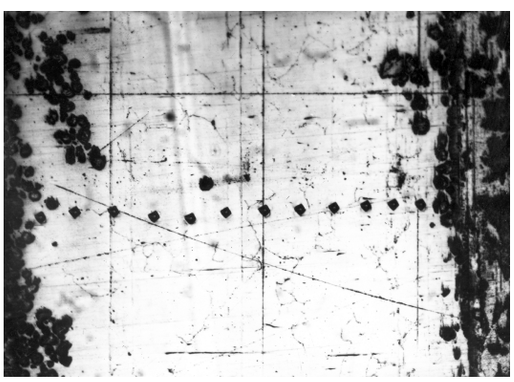


Рис. 1. Диспергирование паяемой стали при заполнении широкого зазора припоем П65, ×110

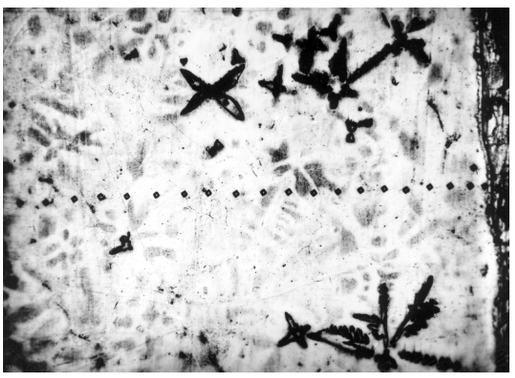


Рис. 2. Кристаллы инородной фазы в шве, паяном припоем П65, ×110

отличались высокой плотностью и полным отсутствием неметаллических включений и несплошностей. По всему паяному шву располагаются крупные кристаллы инородной фазы (рис. 2).

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что эти кристаллы имеют железную основу (рис. 3), следовательно, являются избыточной фазой припоя, выделившейся из расплава при его кристаллизации. Паяные швы шириной до 3 мм равномерно насыщены железом.

Таким образом, припой в подвижном состоянии может не только интенсивно диспергировать паяемый металл, но и интенсивно растворять его частицы с равномерным распределением по всему объему, насыщаясь элементами паяемого металла независимо от

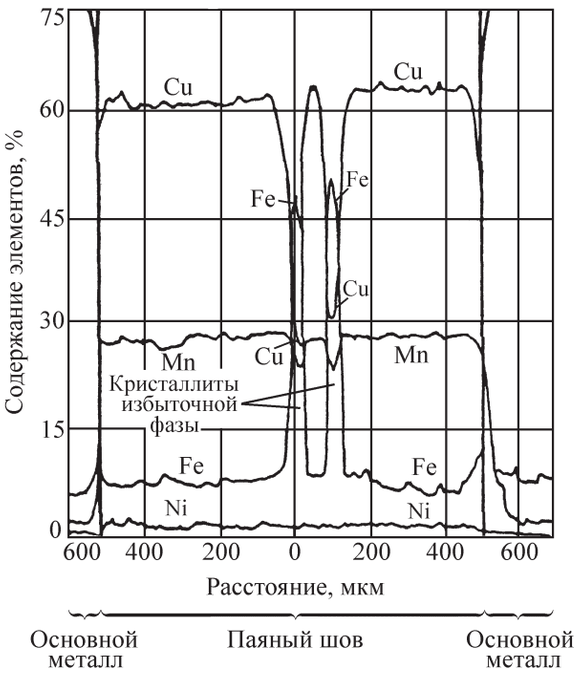


Рис. 3. Распределение элементов по шву, паяному припоем П65 (ширина зазора 3 мм)

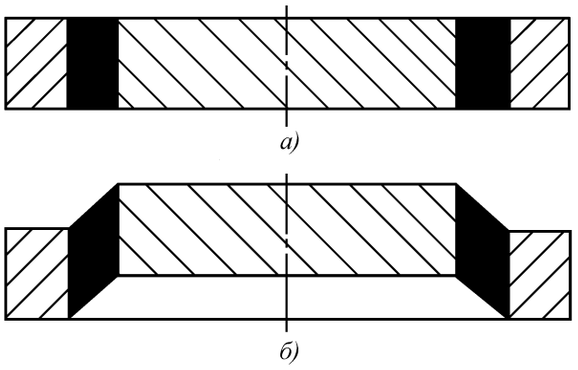


Рис. 4. Угол сдвига паяного шва после испытания на срез:
а – исходное состояние образца; *б* – после испытания на срез

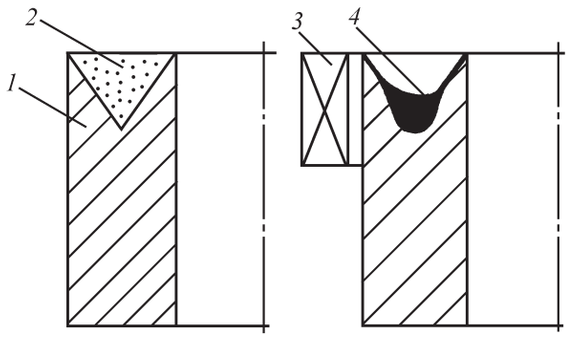


Рис. 5. Изменение сечения разделки после индукционной плавки припоя П-87:
1 – труба; *2* – порошок припоя; *3* – индуктор; *4* – закристаллизовавшийся припой

ширины зазора. Это свидетельствует о высокой эффективности эрозионно-растворного процесса при подвижном припое.

Такие существенные изменения структуры и состава припоев в широком паяном шве привели к уникальным результатам механических испытаний образцов соединений на срез. Образцы представляли собой диски высотой 10 мм, вырезанные из паяных соединений. Предел прочности паяного образца на срез превысил нормативный предел прочности припоя П65 на растяжение.

Впервые в практике пайки получен широкий (3 мм) пластичный паяный шов, который в процессе испытания образовал угол сдвига, равный 30° (рис. 4).

Испытания проводили на прессе силой 1 МН, поэтому образцы не разрушались. Следовательно, насыщение подвижного расплава припоя элементами паяемого металла путем активного растворения его диспергированных частиц и возникновение избыточной фазы на основе железа по всему объему припоя обеспечивает значительное повышение прочности и пластичности широкого паяного шва.

Скорость диспергирования и растворения паяемого металла зависит от степени подвижности расплава припоя. Наиболее интенсивное перемешивание расплава происходит при индукционной пайке изделий с широкими фиксированными зазорами. Элекромагнитное перемешивание жидкого металла широко применяют при сварке и плавке металлов для улучшения их структуры и свойств.

Процесс электромагнитного перемешивания можно визуально наблюдать при индукционной плавке порошка припоя П-87 в V-образной разделке трубы (рис. 5). Об эффективности действия эрозионно-растворного процесса при перемешивании можно судить по состоянию разделки трубы после плавки. При времени индукционного нагрева 60 с и выдержке 30 с произошло резкое изменение конфигурации разделки вследствие перехода большой массы металла в расплав припоя. Содержание железа в нем возросло от 40 до 75 %.

Если паяемый металл имеет хорошую растворимость в припое с образованием твердого раствора, то эрозионно-растворный процесс имеет свои особенности. Как известно, скорость атомарной диффузии на границе с паяемым металлом достаточно высока.

Подсчитано, что, например, при пайке железа медью при зазоре 0,1 мм время, необходимое для насыщения меди железом до 0,9 от предельной растворимости железа в меди при температуре пайки, составляет менее 0,3 с [3]. При такой высокой скорости диффузии на границе с паяемым металлом, образующим с припоем твердый раствор, в процессе пайки кристаллизуется переходный слой. Учитывая, что его толщина на порядок меньше вышеуказанной (0,1 мм), можно сделать заключение о том, что образование твердого переходного слоя происходит практически мгновенно, т.е. в момент образования контакта движущего расплава припоя с паяемым металлом. Последующее перемещение расплава припоя происходит уже по поверхности твердого переходного слоя.

Переходный слой надежно изолирует паяемый металл от непосредственного воздействия подвижного расплава припоя. Эрозионно-растворный процесс протекает только на его поверхности. Диффундирующие через переходный слой элементы паяемого металла подхватываются движущимся расплавом и разносятся по его массе, вследствие чего в переходном слое поддерживается высокая скорость диффузионного потока. Одновременно происходит диспергирование этого слоя и интенсивный перенос его частиц в глубину расплава.

В местах отрыва частиц переходного слоя происходит его быстрое зарастание до прежних границ, поэтому даже при самом интенсивном перемешивании расплава припоя поддерживается определенная толщина переходного слоя (рис. 6). Такой же процесс массообмена протекает и на поверхности стальных частиц наполнителя, вносимых с припоем в зазор. При таком

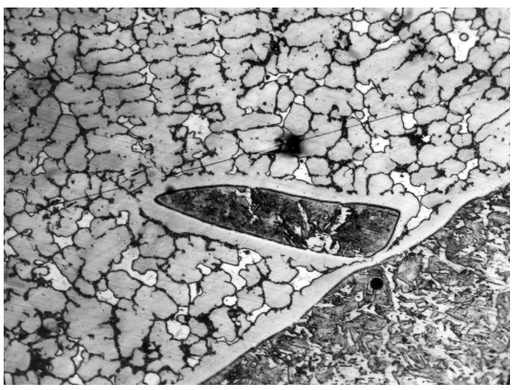


Рис. 6. Состояние переходного слоя припоя на поверхностях паяемого металла и частицы наполнителя, ×110

механизме массообмена локальной эрозии в паяльном зазоре не происходит, равномерность зазора не нарушается. Приведенная схема массообмена сохраняется при любой возможной степени подвижности расплава припоя в зазоре.

Для определения общих закономерностей изменения состава и свойств припоя при индукционном нагреве проводили исследования швов торцевых соединений стальных планок сечением 30×50 мм, паяных с широкими фиксированными зазорами [2]. В качестве припоев применяли: марганец, образующий с железом неограниченные твердые растворы, припой П-87, содержащий 40 % железа и медь, не образующую с железом твердых растворов.

Особый интерес представляет распределение железа в шве, паяном медью. Если фотоколориметрический анализ шва показывает предельную для меди насыщенность железом, то микрорентгеноспектральный анализ выявил на отдельных участках содержание железа, значительно превышающее его предельную растворимость в меди. Металлографический анализ показал, что избыточная фаза на основе железа в виде отдельных кристаллов равномерно распределена по всему объему широкого шва. С уменьшением зазора размер кристаллов избыточной фазы уменьшается (рис. 7).

Характерной особенностью паяных швов является их высокая плотность, отсутствие в швах включений и пор. Показательным является также отсутствие локальной эрозии паяемого металла и равномерность зазоров.

Перемешивание расплава припоя в узких зазорах (0,5 мм) может привести к разрыву потока припоя, к нарушению его сплошности, вследствие чего возникают крупные раковины и несплошности в шве. В этом случае необходимо снизить степень влияния электромагнитных сил на расплав припоя, что достигается применением двойного индуктора, витки которого располагаются вне области формирования паяного соединения.

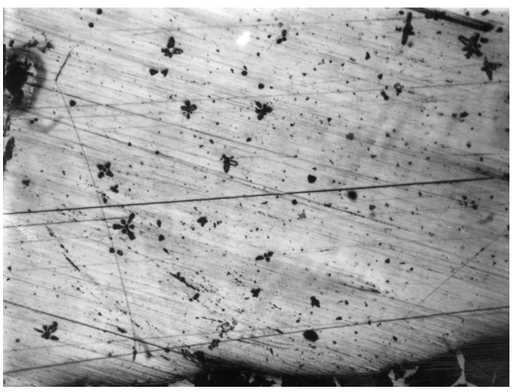
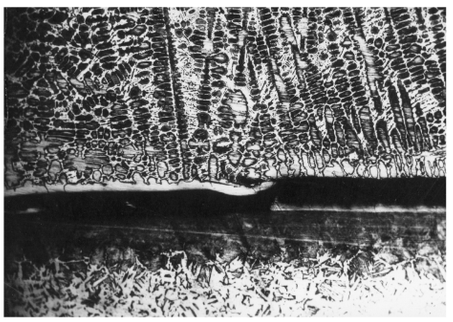


Рис. 7. Избыточная фаза на основе железа в шве, паяном медью, ×110

Если насыщение припоя элементами паяемого металла приводит к образованию сплава, коэффициент линейного расширения α которого значительно отличается от аналогичного коэффициента паяемого металла, то при охлаждении на их границе могут возникнуть напряжения, которые приведут к разрушению паяного шва.

Подобные дефекты были обнаружены при изучении паяных с индукционным нагревом стыков труб, где применялся припой П-87. Припой П-87 имеет в

а)



б)

Рис. 8. Отслоение припоя в шве косостыкового соединения труб:
а – внешний вид дефектного участка (блестящая область – отслоение по границе с паяемым металлом, матовая – по границе с переходным слоем); *б* – характер отслоения припоя, ×110

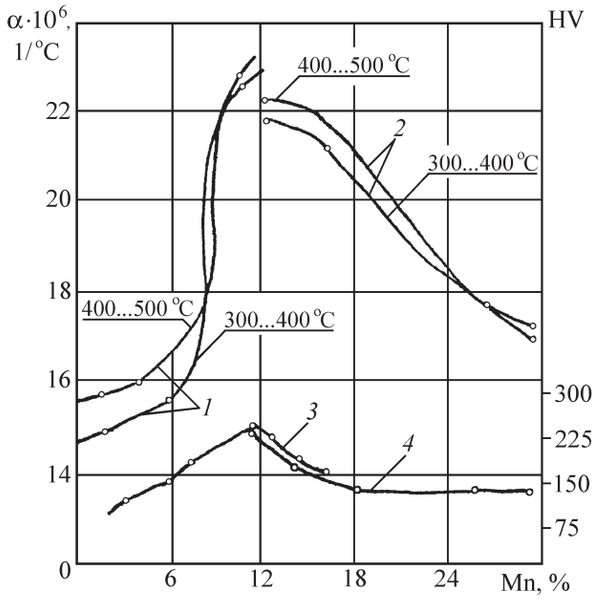


Рис. 9. Зависимость коэффициента линейного расширения *α* (*1, 2*) и твердости HV (*3, 4*) от содержания марганца в железомарганцевых сплавах (по различным литературным источникам)

состоянии поставки однородную структуру и одинаковую химическую природу со сталью. Однако после разрушения паяных соединений было обнаружено отслоение припоя от поверхности паяемого металла.

Отслоение происходило по границе паяемый металл – переходный слой или переходный слой – зона сплавления (рис. 8). Такой же характер отслоения припоя отмечался на внутренней поверхности стыка при вытекании его избытка из зазора.

При микрорентгеноструктурном анализе выявлено, что отслоившийся от паяемого металла припой содержит около 14 % Mn вследствие обогащения припоя железом (76 %).

Известно, что железомарганцевые сплавы с содержанием марганца 9...20 % имеют аномально высокие показатели α, значительно отличающиеся от других сплавов и стали (рис. 9). Следовательно, возникшие в шве внутренние напряжения привели к отслоению припоя.

Металлографический анализ отслоившихся участков припоя показал, что разрушение переходного слоя происходит потоком расплава при свободном расположении его на внутренней поверхности стыка (рис. 10). Равномерные толщина и границы переходного слоя в отслоившемся припое в шве (рис. 11) свидетельствуют о перемешивании припоя вдоль паяльного зазора. Признаков разрушения переходного слоя не наблюдается.

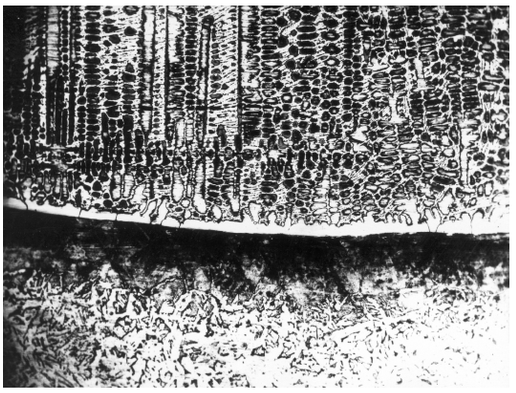


Рис. 10. Диспергирование переходного слоя расплавом припоя П-87 на внутренней поверхности стыка, ×110

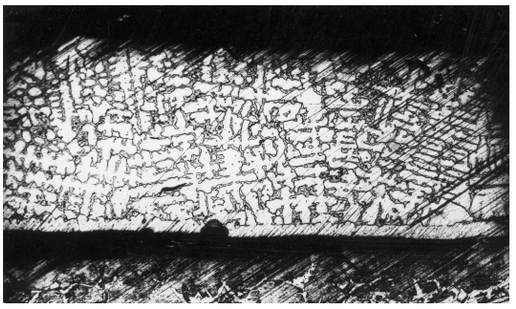


Рис. 11. Отслоившийся припой на паяном шве, ×110

Способность расплава припоя интенсивно растворять паяемый металл считается отрицательным свойством, так как ухудшает смачиваемость, вызывает хрупкость и локальную эрозию паяемого металла. Однако проведенные исследования позволяют по-иному взглянуть на это свойство припоя. Изучение эрозионно-растворного процесса и поиск механизмов управления им обеспечат новый уровень развития паяльного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Радзиевский В.Н. и др.** Автовакуумная пайка крупногабаритных стальных деталей // Сварочное производство. 1988. № 10.

2. **Карабанов В.В.** Некапиллярная пайка – новый этап развития теории и практики паяльного производства // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 10. С. 14–19.

3. **Справочник** по пайке / под ред. И.Е. Петрунина. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.

Виктор Владимирович Карабанов, канд. техн. наук

А.Г. Навроцкий

К 100-летию со дня рождения Г.А. Навроцкого

Георгий Александрович Навроцкий родился 1 февраля 1908 г. в дворянской семье в городе Сновск (ныне г. Щорс) Черниговской области, Украина.

После окончания Брянского индустриального техникума в 1927 г. Георгий Александрович работал конструктором на заводе "Красное Сормово" в Нижнем Новгороде. Через год он переехал в Москву и поступил на 1-й Государственный автомобильный завод (АМО ЗиЛ), где прошел путь от конструктора отдела Главного механика инструментального цеха до инженера Бюро подготовки нового производства.

За активную творческую работу на заводе и как победитель в соцсоревновании Георгий Александрович был премирован легковым автомобилем М-1 (типа Форд). В 1935 г. в день праздника 1 Мая все ударники, премированные автомобилями, приняли участие в автомобильном пробеге Москва–Ярославль–Москва. Автопробег по дорогам России был довольно тяжелым, но все участники остались довольны хорошей организацией пробега и радушными приемами.

Работая на заводе, Георгий Александрович экстерном закончил Московский механический институт им. М.В. Ломоносова и получил квалификацию инженера-механика.

В последующие годы Георгий Александрович работал начальником конструкторского бюро нового оборудования на Горьковском автозаводе, начальником отдела кузнечно-прессовых автоматов в ЦБКМ в Москве.

В 1941 г. Георгий Александрович направлен в г. Арзамас и далее в г. Саров на машиностроительный завод для оказания помощи в наладке автоматических линий, а в марте 1942 г. – в Серпухов для восстановления разрушенного завода "Имени 8-летия Октября". В сентябре этого же года Г.А. Навроцкий приказом по Главному управлению кузнечного машиностроения (Гукмаша) назначен заместителем директора и главным инженером завода, где он не только руководил проектированием специального оборудования, но и организовывал производство для штамповки деталей боеприпасов.

В июне 1943 г. распоряжением Гукмаша Г.А. Навроцкий переведен в Москву, где проектировал в ЦБКМ оборудование для производства боеприпасов и принимал участие в производстве плоских штыков в ЦНИИТМАШе.

На основе собранных материалов и опыта работы на производстве и в конструкторских бюро Георгий Александрович подготовил рукопись своей первой книги "Холодновысадочные автоматы" (М. – Свердловск, 1944), при работе над которой ему оказал большую помощь д-р техн. наук, проф. МВТУ им. Н.Э. Баумана А.И. Зимин. Эта книга способствовала развитию отечественного проектирования высокопроизводительных метизных автоматов.

В 1945 г. Георгий Александрович начал работать старшим преподавателем в Московском механическом институте, а затем – заведующим кафедрой "Ковка и штамповка", заменив на этом посту проф. В.Т. Мещерина. По результатам научно-исследовательских работ Георгий Александрович подготовил кандидатскую диссертацию по конструированию и исследованию холодновысадочных автоматов, в 1946 г. успешно защитил ее в МВТУ им. Н.Э. Баумана и начал работать старшим научным сотрудником в Научно-исследовательском секторе ЦБКМ.

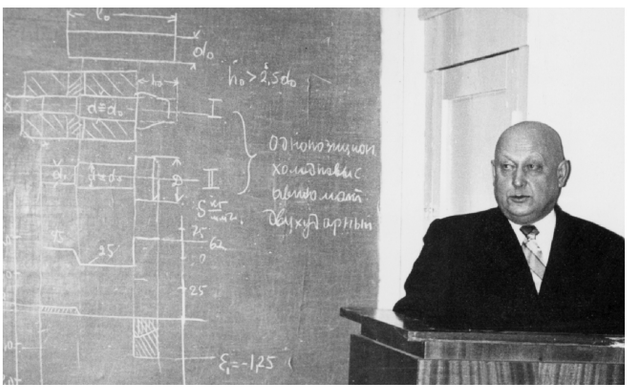
В 1946 г. Георгий Александрович избран по конкурсу в Московский станкоинструментальный институт на кафедру "Оборудование и технология штамповочного производства". Преподавая в институте, выпустил вторую книгу "Высадочные и обрезные автоматы".

С 1952 по 1954 г. Г.А. Навроцкий работал заместителем начальника технологического отдела Научно-исследовательского института химического машиностроения (НИИХИММАШ), читал лекции в ВЗМИ и руководил лабораторией пластических деформаций во ВНИИинструмента.

В 1955 г. Г.А. Навроцкий по приказу Министерства станкостроения и инструментальной промышленности назначен на должность заместителя директора по научной части организуемого экспериментального научно-исследовательского института кузнечно-прессового машиностроения ЭНИКМАШ в г. Воронеже.

В марте 1958 г. Г.А. Навроцкий переведен из ЭНИКМАШ и зачислен в штат ЦБКМ на должность начальника отдела агрегатных прессов. В 1956 г. по его инициативе создается первое в СССР специальное конструкторское бюро (СКБ-9) в г. Азове Ростовской области по проектированию холодновысадочных автоматов и строится завод по их изготовлению.

С 1959 по 1960 г. Г.А. Навроцкий работал главным специалистом Госкомитета Совета Министров СССР по автоматизации и машиностроению и курировал выполнение научно-технической работы кузнечно-прессовых заводов страны.



В сентябре 1960 г. Георгий Александрович избран на должность доцента кафедры "Машины и технология обработки металлов давлением " Московского автомеханического института (МАМИ). В 1965 г. Г.А. Навроцкий выпустил третью основополагающую книгу "Кузнечно-штамповочные автоматы". В 1966 г. Георгий Александрович защитил докторскую диссертацию и в 1967 г. избран профессором этой же кафедры. В 1977 г. Г.А. Навроцкий становится заведующим этой кафедрой и руководит ею до 1985 г.

За время работы на кафедре Г.А. Навроцкий подготовил большое число молодых специалистов и 30 кандидатов наук. Им написаны более 150 печатных трудов, в том числе 21 монография, справочники и брошюры по технологии и оборудованию кузнечно-прессового производства. В 1981 г. Георгию Александровичу присвоено звание "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР".

Плодотворный научный и педагогический труд и активная общественная деятельность Г.А. Навроцкого были отмечены правительственными наградами – "За оборону Москвы", "За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.", "В память 800-летия Москвы", "За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина", «30 лет Победы под Москвой", "30 лет (и 40 лет) Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.", "Почетная медаль Минвуза РСФСР", Почетными Грамотами Президиума Верховного Совета РСФСР, Минвуза СССР и РСФСР, Минстанкопрома, Всесоюзного общества "Знание" и др.

Ученики Георгия Александровича Навроцкого высоко чтут своего наставника, хранят память о нем и продолжают начатое им дело.

Александр Георгиевич Навроцкий, канд. техн. наук

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

Выбор значений коэффициентов обратной связи электрогидравлической системы управления подвижной траверсой штамповочного пресса на этапе проектирования

Приведены краткие сведения об исполнении модернизированной электрогидравлической системы управления подвижной траверсой штамповочного пресса НП-130 силой 300 МН и о принятом алгоритме управления траверсой, направленном на обеспечение ее движения с заданной скоростью и минимальным перекосом относительно горизонтальной плоскости. Изложен подход к выбору значений коэффициентов обратной связи системы управления на этапе проектирования на основе моделирования работы пресса с использованием программного комплекса ПРАНС-ПК.

Data on performance of the modernized electric-hydraulic control system walking beam stamping press NP-130 by force 300 MH are resulted.

В шестидесятые годы прошлого века на новосибирском заводе "Тяжстанкогидропресс" им. А.И. Ефремова был разработан и изготовлен гидравлический штамповочный пресс НП-130 силой 300 МН, имеющий уникальную конструкцию [1].

Особенностью исполнения пресса НП-130 является отсутствие в его составе верхней неподвижной траверсы (архитрава).

В нижней траверсе пресса, собранной из двух частей, скрепленных стяжными болтами, установлены четыре колонны. Подвижная траверса, являющаяся в данном прессе одновременно верхней, также состоит из двух частей, стянутых болтами. Корпуса четырех рабочих гидроцилиндров, оси которых совмещены с осями колонн, вмонтированы в подвижную траверсу и перемещаются вместе с ней относительно неподвижных поршней и втулок, закрепленных на верхних концах колонн.

Благодаря такому исполнению пресса его габаритные размеры и масса существенно меньше аналогичных параметров других прессов отечественного и зарубежного производства на ту же силу, имеющих традиционную компоновку.

Стремление максимально снизить массу пресса в результате минимизации нагружения его колонн поперечными силами (и обеспечения нагружения их в основном лишь растягивающими силами) привело к оснащению пресса автоматически действующей системой, предназначенной для уменьшения до минимума перекоса подвижной траверсы относительно горизонтальной плоскости благодаря синхронизации перемещения корпусов рабочих гидроцилиндров (при обеспечении заданной скорости движения траверсы на всех этапах технологического цикла работы пресса).

Пресс НП-130 был смонтирован в плавильном цехе Верхнесалдинского металлургического производственного объединения (ныне ОАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА") и используется там до настоящего времени, главным образом, для получения слябов из цилиндрических заготовок. При последующей обработке слябы поступают в качестве подката на прокатный стан, в связи с чем к их оформленности (в виде параллелепипеда) и параллельности их верхней и нижней плоскостей предъявляют высокие требования.

После штамповки на прессе требуемая параллельность верхней и нижней плоскостей сляба обеспечивается его обработкой на строгальном станке. При этом, очевидно, чем больше непараллельность верхней и нижней плоскостей сляба (т.е. его клиновидность) после штамповки, тем большее количество металла снимается на строгальном станке (толщина сляба может колебаться в определенных пределах) и, соответственно, увеличиваются трудозатраты и уменьшается выпуск готовой продукции.

Таким образом, уменьшение до минимума перекосов подвижной траверсы при работе пресса НП-130 необходимо для увеличения его долговечности и повышения качества штампуемых на прессе слябов.

Штатная система управления подвижной траверсой пресса НП-130 является гидромеханической [1]. Большое количество шарнирных, шлицевых, зубчатых и резьбовых соединений, подвергающихся в процессе работы пресса износу, что влечет за собой появление люфтов, делает данную систему ненадежной в эксплуатации, недостаточно точной и неудобной с точки зрения настройки.

В связи с этим приняли решение при очередном капитальном ремонте пресса модернизировать систему управления его подвижной траверсой.

Модернизированная система управления подвижной траверсой является электрогидравлической

(рис. 1). От прежней системы в ней сохранились лишь рабочие и подъемные гидроцилиндры и корпусные детали клапанных гидрораспределителей этих гидроцилиндров. Корпусы клапанных гидрораспределителей, изготовленные из углеродистой конструкционной стали, подвергнуты доработке, заключающейся в наплавке коррозионно-стойкой стали на все уплотняемые поверхности.

Для управления каждым из рабочих гидроцилиндров ЦР пресса используется индивидуальный двухклапанный гидрораспределитель РЦР, содержащий напорный КНЦР и наполнительно-сливной КНСЦР клапаны, а для управления четырьмя подъемными гидроцилиндрами ЦП – один общий двухклапанный гидрораспределитель РЦП, содержащий напорный КНЦП и сливной КСЦП клапаны.

В штатной системе управления пресса для устранения возникающего перекоса подвижной траверсы относительно горизонтальной плоскости во время холостого хода и при подъеме использовались наполнительно-сливные клапаны КНСЦР. В модернизированной системе для обеспечения более качественного решения указанной задачи рабочая полость каждого из подъемных гидроцилиндров соединена с исполнительным каналом двухклапанного гидрораспределителя РЦП индивидуальным регулируемым дросселем ДР золотникового типа с разгруженным запорно-регулирующим элементом (ЗРЭ). Благодаря введению в гидросистему пресса дросселей ДР, отпала необходимость делать регулирующими наполнительно-сливные клапаны рабочих гидроцилиндров и напорный и сливной клапаны подъемных гидроцилиндров.

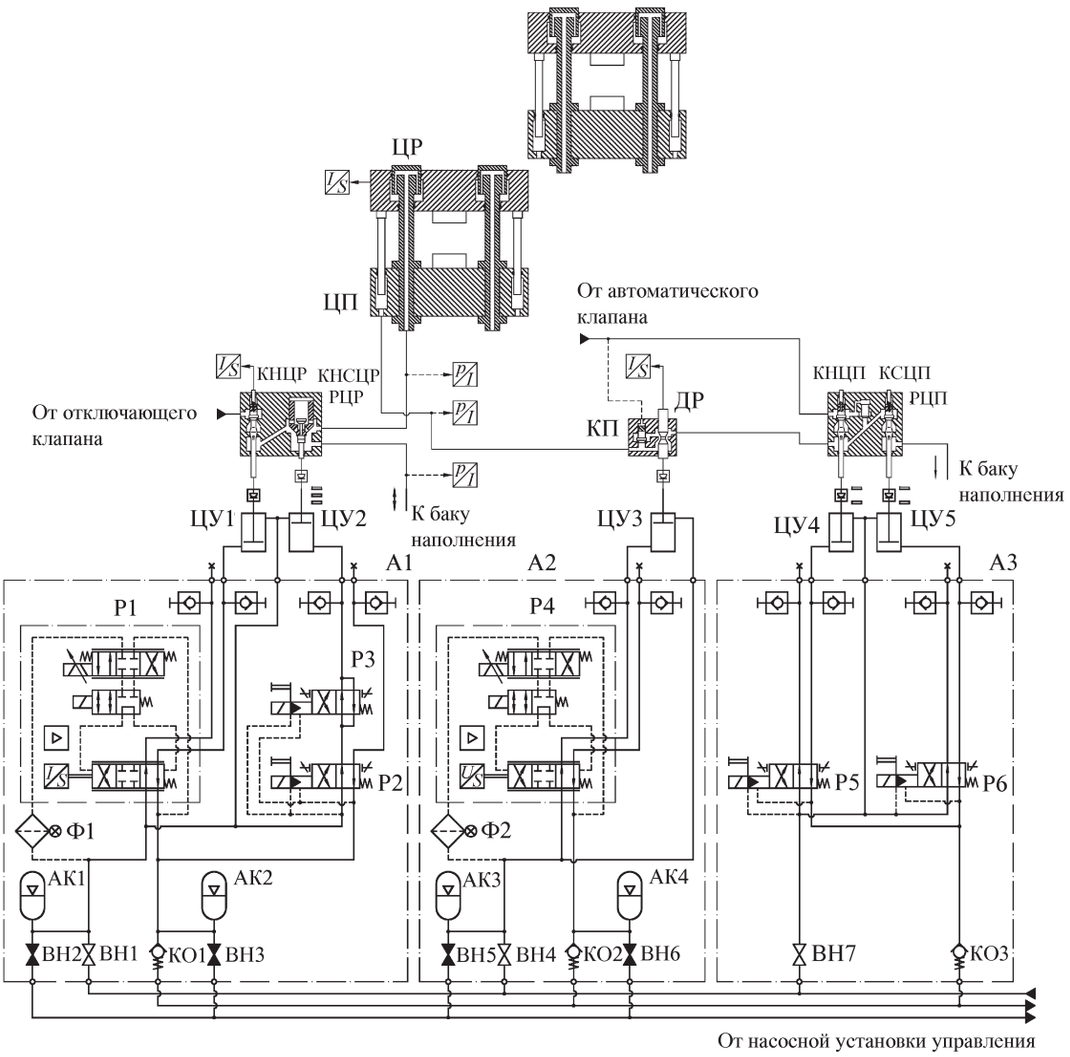


Рис. 1. Фрагмент принципиальной гидравлической схемы модернизированной электрогидравлической системы управления пресса НП-130:

Ф1, Ф2 – фильтры; АК1–АК4 – пневмогидравлические аккумуляторы; КО1–КО3 – обратные клапаны; ВН1–ВН7 – краны

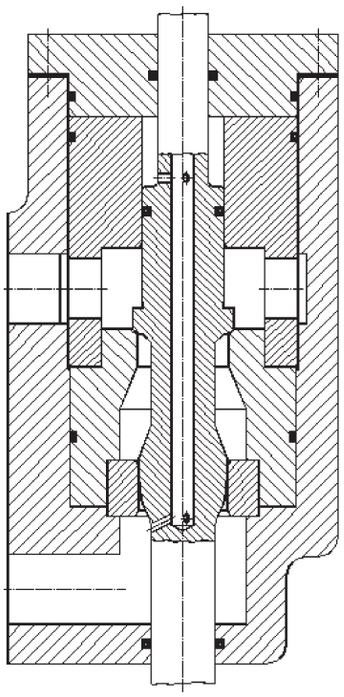


Рис. 2. Конструктивная схема запорно-регулирующего клапана модернизированной электрогидравлической системы управления пресса НП-130

Для исключения чрезмерного повышения давления в полости подъемного гидроцилиндра при запирании в ней рабочей жидкости (воды) дросселем ДР параллельно последнему установлен предохранительный клапан КП, поджим запорного элемента которого к седлу осуществляется не пружиной, а жидкостью высокого давления из напорной гидролинии пресса.

Напорный клапан двухклапанных гидрораспределителей рабочих гидроцилиндров, являющийся запорно-регулирующим, выполнен в соответствии с конструктивной схемой, показанной на рис. 2. Он имеет разнесенные в пространстве запорную и регулирующую части, что способствует повышению срока службы клапанной пары до нарушения ее герметичности.

Клапан выполнен без разгрузочного элемента и характеризуется размерами, выбранными исходя из условия удовлетворения следующих требований:

1) при закрытом проходном сечении клапана напряжения на поверхности контакта запорной фаски ЗРЭ и уплотнительной фаски седла, создаваемые под действием силы давления рабочей жидкости на ЗРЭ, являются достаточными для обеспечения герметичного разделения входного и выходного каналов клапана и в то же время не превосходят значение напряжений, допустимое из условия прочности контактирующих поверхностей;

2) при открытом проходном сечении клапана сила, действующая на ЗРЭ со стороны рабочей жидкости,

Рис. 3. Запорно-регулирующие элементы для напорных клапанов гидрораспределителей рабочих гидроцилиндров пресса НП-130

является достаточной для перемещения ЗРЭ в направлении седла до соприкосновения с ним (с преодолением соответствующих сил сопротивления) [2].

Запорно-регулирующий элемент (рис. 3) рассматриваемых клапанов имеет два штока, один из которых (расположен со стороны регулирующего пояска, спрофилированного соответствующим образом [2]) соединен со штоком гидроцилиндра управления, а другой (расположен со стороны запорной фаски и направляющей части) используется для контроля текущего положения, занимаемого ЗРЭ.

Для контроля текущего положения запорно-регулирующего элемента каждого из напорных клапанов рабочих гидроцилиндров и каждого из регулируемых дросселей и организации местной (локальной) обратной связи по положению этого ЗРЭ перечисленные устройства оснащены датчиками положения.

Подвижный элемент датчика положения соединен с соответствующим штоком ЗРЭ, а корпус датчика – с корпусом гидроаппарата (клапана или дросселя). Местная обратная связь по положению ЗРЭ гидроаппарата организована с использованием электронного усилителя (в состав которого входит пропорционально-интегральный регулятор – ПИ-регулятор) для повышения быстродействия системы управления подвижной траверсой в целом.

Изменение положения запорно-регулирующего (запорного) элемента каждого из вышеупомянутых клапанов и регулируемых дросселей осуществляется с помощью индивидуального гидроцилиндра управления двухстороннего действия с односторонним штоком ЦУ1, ..., ЦУ5, работающего на масле. Шток гидроцилиндра управления соединен с запорно-регулирующим (запорным) элементом без зазора в их осевом направлении шарнирным соединением специальной конструкции (рис. 4), компенсирующим в определенной степени несовпадение осей соединяемых деталей.

Диаметры поршня и штока гидроцилиндров управления выбраны таким образом, чтобы при прочих равных условиях обеспечивались минимальные значения времени перемещения запорно-регулирую-

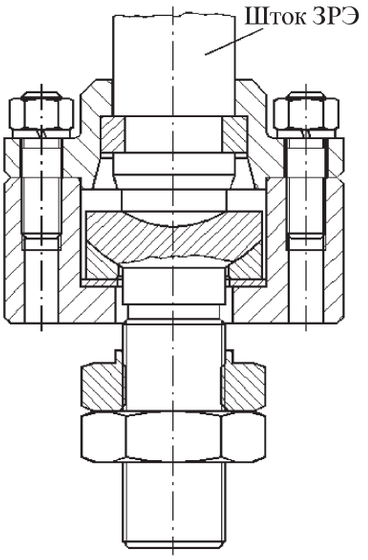


Рис. 4. Шарнирное соединение штоков запорно-регулирующего элемента клапана (регулируемого дросселя) и гидроцилиндра управления

щего (запорного) элемента клапана (дросселя) из одного крайнего положения в другое [3], а при закрытом с помощью гидроцилиндра управления проходном сечении клапана контактные напряжения между запорными фаской и кромкой запорно-регулирующего (запорного) элемента и его седла не превосходили допустимое значение, рекомендуемое для используемых материалов.

Для управления гидроцилиндрами привода запорных элементов наполнительно-сливных клапанов рабочих гидроцилиндров и напорного и сливного клапанов подъемных гидроцилиндров используются направляющие гидрораспределители Р2, Р5, Р6 с настраиваемой величиной хода золотника выходного каскада в обе стороны.

Для обеспечения пониженной скорости открытия проходного сечения наполнительно-сливного клапана (а точнее разгрузочного клапана последнего) на начальном этапе после окончания рабочего хода пресса (для снижения пиков давления в наполнительно-сливной гидролинии) применяется дополнительный направляющий гидрораспределитель Р3, используемый как дроссель с двумя уровнями настройки.

Для управления гидроцилиндрами привода ЗРЭ напорных клапанов рабочих гидроцилиндров и регулируемых дросселей используются гидрораспределители Р1, Р4 с пропорциональным электрическим управлением отказобезопасного исполнения серии D680 фирмы MOOG.

Эти гидрораспределители имеют высокие динамические характеристики и содержат встроенный электронный блок управления, внутреннюю электрическую обратную связь по положению золотника выходного каскада и дополнительный направляющий гидрораспределитель с электрическим управлением, с помощью которого в аварийных ситуациях полости под торцами золотника выходного каскада изолируются от исполнительных гидролиний управляющего каскада и сообщаются между собой. В указанном случае золотник выходного каскада пропорционального гидрораспределителя, примененного в гидросистеме пресса, под действием пружины занимает установленное крайнее положение.

Благодаря возможности бесступенчатого изменения площади проходного сечения напорных клапанов рабочих гидроцилиндров и регулируемых дросселей от нуля до максимума (соответствующими гидроцилиндрами управления), обеспечиваются регулирование скоростей движения краев подвижной траверсы (вдоль осей рабочих и подъемных гидроцилидров) и, соответственно, скорости поступательного движения траверсы в целом и устранение перекоса траверсы относительно горизонтальной плоскости во время рабочего хода (с помощью напорных клапанов рабочих гидроцилиндров) при холостом ходе и подъеме (с помощью регулируемых дросселей).

Электрогидравлическая система управления пресса выполнена таким образом, что в исходном состоянии (при отсутствии управляющих сигналов на изменение положения подвижной траверсы) и в аварийных ситуациях проходные сечения напорных клапанов рабочих гидроцилиндров и напорного и сливного клапанов подъемных гидроцилиндров являются закрытыми, а проходные сечения наполнительно-сливных клапанов рабочих гидроцилиндров и регулируемых дросселей ДР являются открытыми. Благодаря этому (при исправных клапанах) обеспечиваются остановка и удержание подвижной траверсы пресса в произвольном положении при давлении в полостях рабочих гидроцилиндров, находящемся на уровне давления в баках наполнения.

Измерение перемещения в вертикальном направлении четырех контрольных точек подвижной траверсы пресса, расположенных попарно симметрично относительно горизонтальных продольной и поперечной осей траверсы, осуществляется с помощью четырех датчиков перемещения, рассчитанных на полную величину хода подвижной траверсы. Дополнительно контроль перекоса траверсы производится двухосевым датчиком угла наклона.

При подаче команды на перемещение траверсы с заданной скоростью $v_з$ сигнал $U_к$, поступающий с выхода контроллера на вход электронного усилителя каждого пропорционального гидрораспределителя, используемого при выполнении текущей операции, в соответствии с принятым алгоритмом управления складывается:

– из сигнала $U_с$, необходимого для обеспечения перемещения траверсы с заданной скоростью $v_з$ в соответствии с экспериментальными данными, полученными в процессе пусконаладочных работ для некоторой тестовой ситуации;

– из сигнала, пропорционального с коэффициентом усиления $k_{о.с}$ расхождению между координатой $z_з$, которую в текущий момент времени t должна иметь контрольная точка подвижной траверсы при условии ее движения с заданной скоростью $v_з$ с момента начала движения траверсы после подачи текущей команды на ее перемещение, и фактической (фиксируемой с помощью соответствующего датчика перемещения) текущей координатой $z_ф$ данной контрольной точки траверсы в тот же момент времени:

$$k_{о.с}(z_з - z_ф);$$

– из сигнала, пропорционального с коэффициентом усиления $k_и$ интегралу по времени t от разности $(z_з - z_ф)$:

$$k_и \int_0^t (z_з - z_ф).$$

На вход встроенного электронного блока управления пропорционального гидрораспределителя управляющий сигнал $U_у$ с выхода электронного усилителя поступает, будучи дополнительно скорректированным в электронном усилителе с учетом текущей координаты $y_{ЗРЭ}$ ЗРЭ соответствующего регулирующего гидроаппарата (напорного клапана рабочего гидроцилиндра или регулируемого дросселя), по которой организована местная отрицательная обратная связь:

$$U_у = U_к - k_{о.с.м} y_{ЗРЭ} + k_{и.м} \int_0^t (U_к - k_{о.с.м} y_{ЗРЭ}) dt,$$

где $U_к$ – сигнал, поступающий на вход электронного усилителя с выхода контроллера,

$$U_к = U_с + k_{о.с}(z_з - z_ф) + k_и \int_0^t (z_з - z_ф)\, dt;$$

$k_{о.с.м}$ – коэффициент усиления местной обратной связи по положению ЗРЭ соответствующего регулирующего гидроаппарата (напорного клапана рабочего гидроцилиндра или регулируемого дросселя); $k_{и.м}$ – коэффициент усиления интегрирующего звена ПИ-регулятора, входящего в состав электронного усилителя.

Очевидно, что при выбранных параметрах компонентов электрогидравлической системы управления подвижной траверсой пресса характеристики ее работы в целом существенно зависят от значений коэффициентов $k_{о.с}$, $k_и$, $k_{о.с.м}$ и $k_{и.м}$.

Определение оптимальных значений этих коэффициентов опытным путем в процессе пусконаладочных работ при отсутствии какой-либо исходной информации об области их существования является трудоемкой задачей и может потребовать больших затрат времени.

В связи с этим на этапе проектирования системы управления траверсой пресса проведено математическое моделирование этой системы с использованием программного комплекса ПРАНС-ПК (Проектирование Автоматизированное Неоднородных Систем на Персональном Компьютере), разработанного в Национальном техническом университете Украины "КПИ" коллективом под руководством А.И. Петренко [4].

При математическом моделировании системы управления ее рассматривали как систему с сосредоточенными параметрами, работающую при постоянных значениях давления рабочей жидкости в напорных гидролиниях гидропривода пресса и гидросистемы управления, а также в баках наполнения.

Учитывали только потери давления на гидроаппаратах, используемых для осуществления регулирующих функций на текущем этапе работы пресса. При этом зависимость площади проходного сечения регулирующего гидроаппарата от положения (координаты) его ЗРЭ принимали в соответствии с чертежной документацией, а коэффициент гидравлического сопротивления считали постоянным.

Учитывали ограничение перемещения ЗРЭ каждого регулирующего гидроаппарата соответствующими упорами. Связь между управляющим электрическим сигналом, поступающим на вход электронного блока управления пропорционального гидрораспределителя, и перемещением золотника его выходного каскада (при условии, что золотник не сместился до упора) представляли в виде дифференциального уравнения второго порядка (с учетом параметров реальной амплитудно-фазовой частотной характеристики гидрораспределителя).

Сжимаемость учитывали только для жидкости, находящейся в рабочих полостях гидроцилиндров привода подвижной траверсы и присоединенных к ним гидролиниях. Податливость металлоконструкций пресса не учитывали.

С учетом требований, предъявляемых к системе управления пресса, в качестве критерия оптимизации при проведении имитационного моделирования приняли следующий интегральный критерий:

$$F = k_м \int_0^t (\varphi^2 + \psi^2)\, dt,$$

где $k_м$ – масштабный коэффициент; φ, ψ – углы поворота подвижной траверсы пресса из горизонтального положения относительно ее продольной и поперечной горизонтальных осей соответственно.

Оптимальные по критерию F значения коэффициентов $k_{о.с}$, $k_и$, $k_{о.с.м}$ и $k_{и.м}$ помимо параметров пресса (включая неизменяемые параметры системы управления подвижной траверсой) в определенной степени зависят и от условий его работы.

Основной причиной возникновения перекоса подвижной траверсы относительно горизонтальной плоскости является несимметричность действующих на траверсу сил. В наибольшей степени эта несиммет-

ричность проявляется во время рабочего хода траверсы и, главным образом, связана с установкой заготовки на нижний штамп со смещением вдоль продольной горизонтальной оси пресса (вдоль оси передвижения стола пресса).

Отсутствие перекоса подвижной траверсы во время рабочего хода при наличии эксцентричной нагрузки обеспечивается созданием рабочими гидроцилиндрами различных сил при равенстве скоростей перемещения их корпусов, а именно: чем ближе ось рабочего гидроцилиндра к линии действия результирующей силы сопротивления штампуемого изделия деформации, тем большую силу данный гидроцилиндр должен развивать по сравнению с другими гидроцилиндрами и наоборот.

Поскольку максимальная сила, которая может создавать рабочий гидроцилиндр пресса, ограничена, то с увеличением эксцентриситета нагрузки при прочих равных условиях наибольшая сила, которую может создавать пресс без перекоса подвижной траверсы, уменьшается.

Согласно расчетным данным при смещении линии действия результирующей силы сопротивления штампуемого изделия деформации относительно вертикальной оси симметрии пресса вдоль продольной или поперечной горизонтальных осей пресса на величину, составляющую 0,1 от расстояния между вертикальными осями рабочих гидроцилиндров соответственно в продольном или поперечном направлениях, максимальная сила, которую может создавать пресс, снижается на 16,67 %.

Таким образом, при штамповке несимметричных изделий штамп и матрица для их изготовления должны крепится на прессе так, чтобы линия действия результирующей силы сопротивления штампуемого изделия деформации совпадала с вертикальной осью симметрии рабочих гидроцилиндров пресса.

Предварительные расчеты показали, что критерий F и максимальные значения углов φ и ψ при прочих равных условиях увеличиваются с ростом по модулю скорости изменения (dM/dt) и изменения ΔM вращающего момента M:

$$M = R \cdot e,$$

где R – вертикальная составляющая результирующей силы сопротивления перемещению подвижной траверсы; e – расстояние от линии действия силы R до вертикальной оси симметрии рабочих гидроцилиндров пресса.

Поэтому решение задачи оптимизации целесообразно проводить для случая максимально возможных в реальных условиях эксплуатации пресса значений dM/dt и ΔM.

Самые крупные слябы, штампуемые в настоящее время на прессе НП-130, изготовляют из цилиндрической заготовки диаметром 740 мм и длиной 1150 мм и имеют размеры в плане (определяемые размерами используемых штампов): 1600×1070 мм^2.

В научно-техническом центре ОАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА" с использованием комплекса программ DEFORM-3D выполнено моделирование процесса штамповки на прессе НП-130 слябов вышеуказанных размеров из титанового сплава ВТ22 при наличии начального смещения заготовки вдоль продольной оси пресса относительно положения, при котором зазоры между торцами заготовки и соответствующими вертикальными стенками штампа являются одинаковыми, для случая движения подвижной траверсы пресса во время рабочего хода без перекоса.

Согласно полученным результатам после соприкосновения материала заготовки с вертикальной стенкой штампа, в сторону которой была смещена заготовка при ее укладке на нижний штамп, происходит интенсивное увеличение результирующей силы сопротивления заготовки деформации и расстояния между линией ее действия и вертикальной осью штампов.

Для решения задачи определения оптимальных значений коэффициентов $k_{о.с}$, $k_{и}$, $k_{о.с.м}$ и $k_{и.м}$ приняли следующие экстремальные условия нагружения пресса: результирующая сила сопротивления изделия прессованию, действующая со смещением относительно вертикальной оси симметрии рабочих гидроцилиндров пресса, равным 400 мм вдоль продольной горизонтальной оси пресса, за время около 0,5 с увеличивается на 170 МН (при заданной номинальной скорости рабочего хода подвижной траверсы: $v_з$ = = 25 мм/с). Далее данный случай нагружения пресса называется первым.

При решении задачи оптимизации использовали метод переменного порядка с формулой Бройдена–Флетчера–Гольтфарба–Шанно [5], реализованный (наряду с другими методами оптимизации), в программном комплексе ПРАНС-ПК.

Результаты оптимизации представлены в таблице.

На рис. 5 приведены расчетные графики переходных процессов по углу ψ поворота подвижной траверсы пресса из горизонтального положения относительно ее поперечной горизонтальной оси, скорости движения v центральной точки подвижной траверсы и перемещению $y_{ЗРЭ}$ ЗРЭ напорных клапанов рабочих гидроцилиндров для вышеуказанного варианта нагружения пресса (начало нагружения соответствует моменту времени 0,25 с) при оптимальных значениях коэффициентов $k_{о.с}$, $k_{и}$, $k_{о.с.м}$ и $k_{и.м}$ (см. таблицу).

В соответствии с полученными результатами максимальный перекос подвижной траверсы относительно горизонтальной плоскости не превышает $0{,}62 \cdot 10^{-3}$ рад или 0,62 мм/м (см. рис. 5, *а*). Согласно техническому заданию на модернизацию системы управления подвижной траверсой пресса это значение по модулю не должно превышать 1 мм/м и, таким образом, является приемлемым.

Оптимальные по критерию *F* значения варьируемых параметров модернизированной электрогидравлической системы управления пресса при различных условиях эксцентричного нагружения подвижной траверсы

№ п/п	Условия работы пресса	$k_{о.с}$, В/мм	$k_{и}$, В/(мм·с)	$k_{о.с.м}$, В/мм	$k_{и.м}$, 1/с
1	Изменение суммарной силы сопротивления изделия прессованию, действующей с эксцентриситетом 400 мм вдоль продольной горизонтальной оси пресса, за время около 0,5 с от нуля до 170 МН (при скорости рабочего хода подвижной траверсы 25 мм/с)	1,453	3,001	0,235	0,587
2	Скачкообразное изменение* силы сопротивления, приходящейся на один из рабочих гидроцилиндров пресса, на 10 МН	1,602	3,197	0,361	0,202
3	Синусоидальное изменение* силы сопротивления, приходящейся на один из рабочих гидроцилиндров пресса, с амплитудой 10 МН и частотой 1 Гц	1,862	0,242	0,247	0,209

*При скорости рабочего хода подвижной траверсы 25 мм/с и предшествующем значении равномерно распределенной суммарной силы сопротивления изделия прессованию, равном 160 МН.

Скорость движения центральной точки подвижной траверсы во время переходного процесса (см. рис. 5, *б*) находится в интервале 5,16...37,63 мм/с (т.е. отклонение указанной скорости от ее рабочего значения 25 мм/с составляет до 79 %), что связано, главным образом, с высокой скоростью изменения давления в рабочих гидроцилиндрах для рассматриваемого расчетного случая и большим объемом рабочей жидкости в полостях этих гидроцилиндров и присоединенных к ним гидролиниях.

Из графиков перемещения ЗРЭ напорных клапанов рабочих гидроцилиндров (см. рис. 5, *в*, *г*) видно, что проходные сечения напорных клапанов, управляющих парой более нагруженных рабочих гидроцилиндров, в течение некоторого отрезка времени открываются на максимальную величину, определяемую полным ходом этих ЗРЭ.

При имеющейся ограниченной пропускной способности напорных клапанов рабочих гидроцилиндров пресса НП-130 динамические характеристики системы управления его подвижной траверсой в неко-

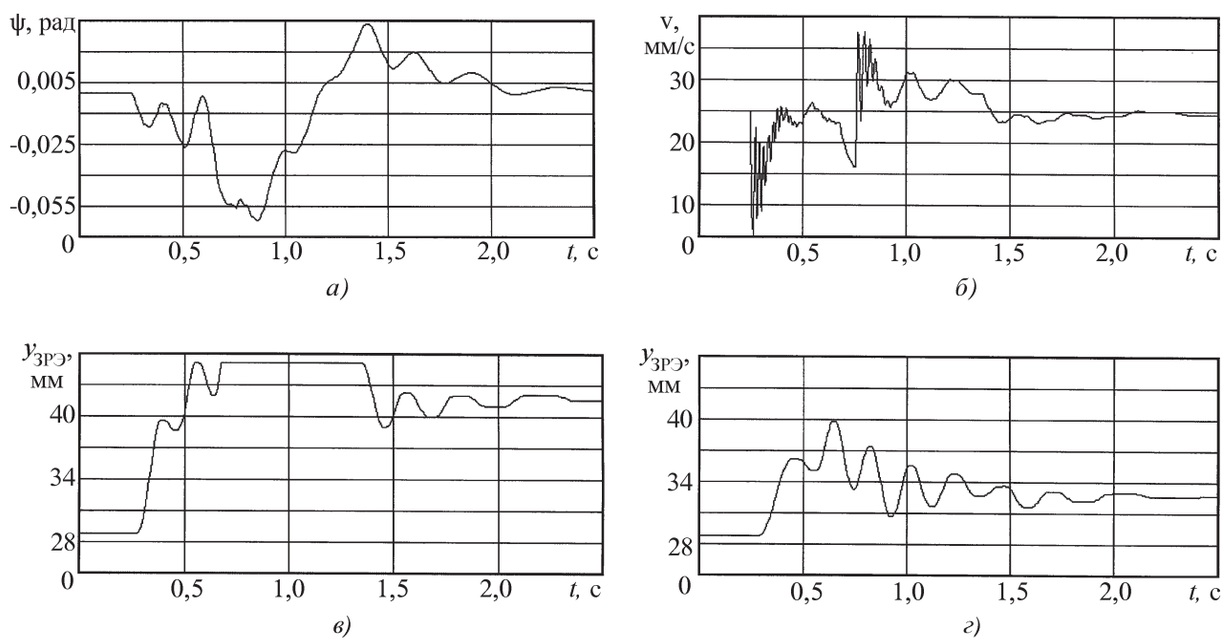


Рис. 5. Графики переходных процессов по углу поворота ψ подвижной траверсы пресса (*а*), скорости движения v центральной точки подвижной траверсы (*б*) и перемещению $y_{ЗРЭ}$ ЗРЭ напорных клапанов рабочих гидроцилиндров, управляющих парой более нагруженных (*в*) и менее нагруженных (*г*) гидроцилиндров, для первого случая нагружения (см. таблицу)

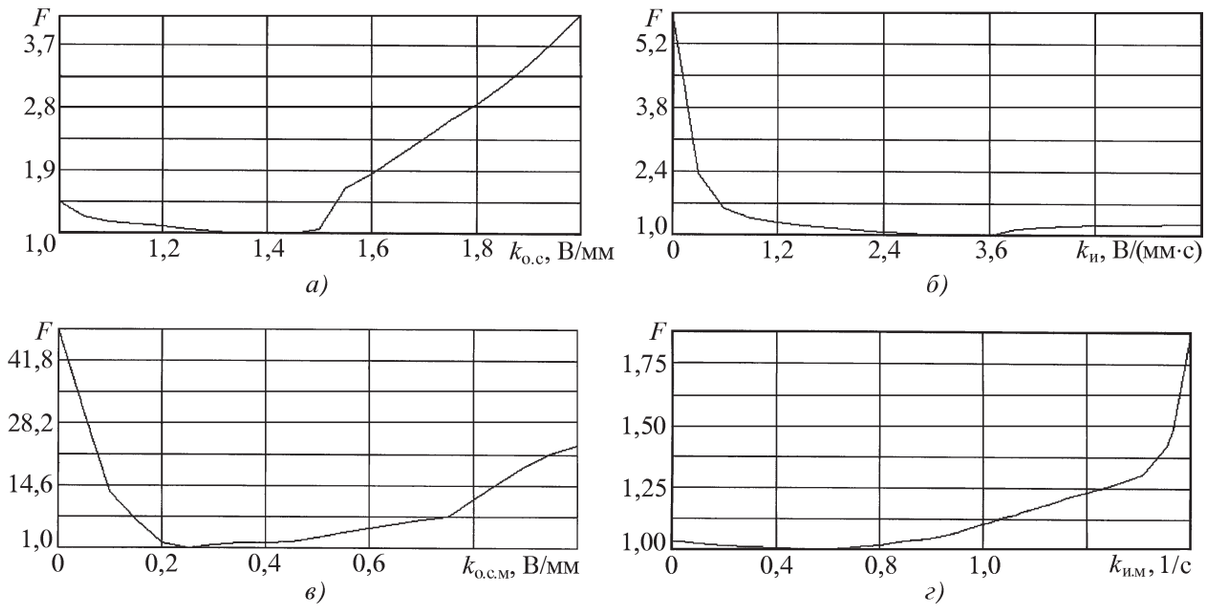


Рис. 6. Зависимость принятого критерия оптимизации *F* от коэффициентов $k_{о.с}$ (*а*), $k_и$ (*б*), $k_{о.с.м}$ (*в*) и $k_{и.м}$ (*г*) для первого случая нагружения (см. таблицу)

торой степени могут быть улучшены путем введения обратной связи по скорости изменения давления в полостях рабочих гидроцилиндров [6].

Для определения влияния оптимизируемых параметров $k_{о.с}$, $k_и$, $k_{о.с.м}$ и $k_{и.м}$ на принятый критерий оптимизации *F* провели многовариантный анализ, в ходе которого при установленных оптимальных значениях трех из указанных варьируемых параметров выполнили расчет переходных процессов в динамической системе пресса и соответствующего критерия *F* при различных значениях четвертого варьируемого параметра для одинаковых временных интервалов.

Результаты многовариантного анализа представлены на рис. 6. Из графиков видно, что при фиксированных условиях нагружения пресса вблизи оптимального значения каждого из варьированных параметров существует определенная зона, в пределах которой изменение параметра не оказывает существенного влияния на принятый критерий оптимизации *F*.

Для получения представления о том, насколько условия эксцентричного нагружения пресса влияют на оптимальные значения коэффициентов $k_{о.с}$, $k_и$, $k_{о.с.м}$ и $k_{и.м}$, в таблице приведены значения последних, полученные в результате моделирования еще для двух случаев нагружения: для случая скачкообразного увеличения нагрузки на один из рабочих гидроцилиндров на 10 МН (далее этот расчетный случай называется вторым) и для случая синусоидального изменения нагрузки на один из рабочих гидроцилиндров с амплитудой 10 МН и частотой 1 Гц (далее этот расчетный случай называется третьим).

Наиболее существенное расхождение оптимальных значений, соответствующих различным условиям нагружения, наблюдается для коэффициента $k_и$. При этом для первого и второго случаев нагружения пресса оптимальные значения коэффициента $k_и$ близки друг к другу и более чем на порядок превышают значение данного коэффициента, оптимальное для третьего случая нагружения.

Данный результат объясняется тем, что при синусоидальном изменении нагрузки ее среднее значение остается неизменным, и, следовательно, для поддержания заданной скорости движения траверсы среднее значение управляющего сигнала $U_к$ на выходе контроллера также практически не должно изменяться.

При увеличении силы сопротивления перемещению траверсы, что характерно для первого и второго случаев нагружения, для обеспечения движения траверсы с заданной скоростью при прочих равных условиях необходимо увеличение площади проходного сечения напорных клапанов рабочих гидроцилиндров.

Это достигается увеличением смещения (координаты) $y_{ЗРЭ}$ ЗРЭ соответствующего клапана относительно его седла вследствие роста до определенного значения сигнала $U_к$ на выходе контроллера, что при фиксированном задающем сигнале $U_с$, стремящемся к нулю текущей погрешности $(z_з - z_ф)$ и минимальном значении критерия оптимизации *F* возможно только благодаря работе интегратора погрешности с повышенным значением коэффициента $k_и$.

С учетом результатов многовариантного анализа, проведенного для трех случаев нагружения, в качестве стартовых при проведении пусконаладочных работ модернизированной электрогидравлической системы управления пресса выбраны следующие значения

варьируемых параметров: $k_{о.с}$ = 1,45 В/мм; $k_и$ = = 0,6 В/(мм·с); $k_{о.с.м}$ = 0,36 В/мм; $k_{и.м}$ = 0,2 1/с.

Проведенное на этапе проектирования моделирование работы пресса НП-130 с модернизированной электрогидравлической системой управления позволило:

– получить представление о работоспособности этой системы (в пределах принятых при моделировании допущений и упрощений), а также ее возможности при переменной эксцентричной нагрузке обеспечить движение подвижной траверсы с перекосами относительно горизонтальной плоскости, находящимися в пределах, предусмотренных техническим заданием;

– определить стартовое значение вектора коэффициентов обратной связи, что должно способствовать снижению трудоемкости пусконаладочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гидравлические** прессы. Некоторые конструкции и расчеты / под ред. Б.П. Васильева. М.: Машиностроение, 1966. 436 с.

2. **Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М.** К вопросу проектирования запорно-регулирующих клапанов гидроприводов прессов // Приводная техника. 2007. № 2. С. 26–31.

3. **Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Гойдо М.Е. и др.** Байпасный клапан для пульсаторного гидропривода радиально-ковочной машины // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2003. № 4. С. 35–40.

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

5. **Петренко А.И., Ладогубец В.В., Чкалов В.В.** Оптимальное схемотехническое проектирование в машиностроении: учеб. пособие. Киев: УМК ВО, 1989. 164 с.

6. **Пат. 2206804 (RU).** Способ регулирования контролируемого параметра выходного звена гидродвигателя электрогидравлического следящего привода / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов // Опубл. в БИ. 2003. № 17.

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

А.С. Езжев, В.Г. Ковалёв, А.Н. Лёгких *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Формование наружной резьбы на трубных заготовках

Изложен новый способ формования наружной резьбы на трубных заготовках, выполнен теоретический анализ напряженно-деформированного состояния в заготовке и представлена опытная резьба.

The new method of external thread forming on tubal workpieces is stated, the theoretical analysis of mode of deformation in workpiece is executed and the experimental thread presented.

На заготовках в виде стержня в условиях серийного и массового производства винтов и болтов резьбы обычно изготовляют методом накатки плоскими плашками или роликами с обеспечением точности 6–9 квалитета. При формовании резьбы накаткой на трубных заготовках даже с оправкой из-за их малой жесткости профиль резьбы или полностью не формуется или получается с большими погрешностями формы и размеров, которые не удовлетворяют требованиям чертежа.

Для обеспечения качества предпочтительно в этом случае использовать процесс холодного объемного формования, при котором получают высокие показатели качества по точности размеров и качеству поверхности.

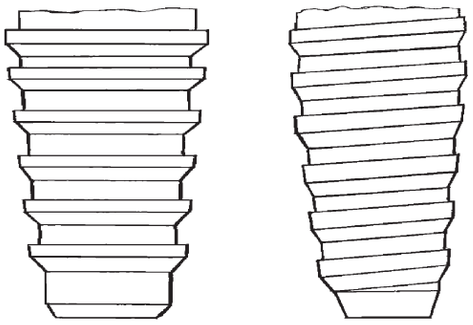
Теоретически возможны следующие способы формования резьбы:

1) одновременное формование по всей поверхности (периметру и длине);

2) постепенное формование.

В первом случае возникают наибольшее напряжение формования и связанные с этим трудности. С учетом сложности контура изделия (малые радиусы на вершине гребешка резьбы и необходимость достижения большой логарифмической степени деформации $e > 1{,}3$) возникает сомнение, что этим способом можно получить полный профиль резьбы при любых условиях.

По второму способу, учитывая возможности изготовления качественной резьбы способами накатки, можно предложить почти такое же, как и при накатке, формование резьбы – поэтапное постепенное формование резьбы по всему диаметру заготовки с частичным или полным снятием напряжения в очаге дефор-



а) *б)*

Рис. 1. Конструктивно-схематическое представление пуансона с кольцевыми деформирующими поясками (*а*) и спиральными деформирующими поясками (*б*)

мации после каждого этапа. Соответственно этому происходит частичное или полное снятие сил трения, препятствующих заполнению вершины профиля резьбы.

При очередном этапе деформирования увеличение напряжения будет сопровождаться увеличением напряжения, вызванного силой трения, но не от максимального ее значения в предыдущем этапе, а от нуля или меньшего ее значения, что и будет способствовать более легкому поэтапному заполнению вершины резьбы, как и при накатке. Это также обеспечит возможность уменьшения среднего давления на внутреннюю поверхность матрицы.

Для осуществления этих процессов второго способа возможно использование двух видов формования. Одновременное формование резьбы по диаметру на длине только одного шага кольцевыми поясками (рис. 1, *а*), периодически расположенными на некотором в направлении оси расстоянии на конической деформирующей поверхности инструмента.

Припуск Δ на деформирование каждым пояском должен быть не более припуска при деформировании на один оборот заготовки в процессах накатки резьбы. Проверенные практикой значения припуска – радиальной подачи на один оборот при накатывании резьбы приведены в табл. 1 и составляют 0,0175... 0,3000 мм/об для приведенных материалов.

Для сплавов с высокой прочностью, когда требуется большая длина пуансона и его продольная устойчивость недостаточна, процесс формования может быть выполнен последовательно несколькими пуансонами. Так как радиальная подача на один оборот при накатывании резьбы относится к половине периметра (обе плашки выполняют формование резьбы), то подача на один кольцевой выступ должна быть в 2 раза меньше.

Осевой шаг t кольцевых деформирующих поясков должен обеспечивать возможно большую разгрузку деформированной части заготовки и, очевидно, нужно при этом учитывать толщину трубной заготовки S_T и шаг резьбы P. С увеличением этих параметров шаг деформирующих поясков должен увеличиваться. По мнению авторов статьи, он должен быть не менее $t \geq 3P + 2S_T$; причем чем больше будет этот шаг, тем меньше среднее давление на матрицу и увеличение ее внутреннего диаметра.

Угол конусности деформирующей поверхности пуансона определяется на основе оптимизации силы формообразования резьбы.

Число деформирующих поясков определяется как частное от деления высоты профиля резьбы h_1 на допустимое значение припуска Δ на каждый поясок при одинаковом припуске на каждый поясок: $n = h_1/\Delta$.

С увеличением номера деформирующего пояска возможно целесообразным будет постепенное уменьшение припуска на деформирование, что улучшит заполнение резьбы у вершины. Однако это увеличивает длину пуансона в осевом направлении.

Вторым видом поэтапного формования резьбы является формование инструментом со спиральными деформирующими поясками на конической поверхности пуансона (рис. 1, *б*). Шаг расположения этих поясков и припуск в среднем на один оборот спирали остаются прежними. Число спиральных поясков должно быть таким, чтобы радиальные силы, сдвигающие инструмент от оси, были взаимно уравновешены.

1. Радиальная подача при накатке резьбы, мм/об

Материал	Шаг резьбы, мм				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Сталь с временным сопротивлением $\sigma_в$, МПа:					
до 40	0,045...0,15	0,06...0,0175	0,75...0,20	0,08...0,25	0,085...0,26
40...50	0,03...0,10	0,045...0,15	0,06...0,175	0,075...0,225	0,08...0,25
свыше 50	0,025...0,09	0,045...0,15	0,055...0,16	0,06...0,20	0,065...0,225
Латунь	0,04...0,175	0,05...0,20	0,06...0,23	0,07...0,27	0,08...0,30

Направление подъема спирали предпочтительно выбирать противоположным направлению подъема витков резьбы. В этом случае затеканию материала в резьбовую канавку инструмента будут способствовать не только радиальная, но и окружная составляющая деформирующего напряжения. С учетом того, что спираль длиннее окружности, сила деформирования будет больше, чем при использовании инструмента с кольцевыми деформирующими поясками.

Обязательным условием формования резьбы в этих случаях является отсутствие течения материала в осевом направлении.

Важнейшим после формования резьбы является процесс удаления детали из штампа. Наружная резьба образуется при незначительной раздаче трубной заготовки, поэтому деформация разгрузки детали значительно меньше деформации разгрузки резьбовой матрицы. Из-за этого деталь плотно охватывается матрицей и для ее удаления необходимо прикладывать большой момент, который можно значительно снизить в результате максимальных сил разгрузки трубной части резьбы и инструмента.

Для успешного вывинчивания детали из матрицы после формования резьбы должны быть совместно использованы следующие четыре основные конструкторско-технологические решения:

1. Конструкция пуансона должна обеспечивать возможность поэтапного формования резьбы и минимальное среднее давление на рабочую поверхность матрицы; указанные выше рекомендации ($t \geq 2P + 2S_T$) позволяют снизить напряжения на рабочую поверхность матрицы в среднем ориентировочно в 4–5 раз.

2. Матрица должна быть бандажированной, это снижает действующие растягивающие напряжения у внутренней поверхности матрицы и увеличивает диаметр матрицы.

3. Высота матрицы должна быть в 2–3 раза больше длины нагруженной части матрицы, а нагрузка формования резьбы располагаться в средней части по высоте матрицы. В результате эффекта разгрузки рабочего участка матрицы из-за возникновения дополнительных напряжений в прилегающих ненагруженных участках уменьшаются напряжения и деформации в рабочей части матрицы.

4. Степень раздачи заготовки должна обеспечить наибольшую разгрузку резьбовой части детали, при которой ее размеры уменьшатся. Этот эффект можно получить при соответствующем коэффициенте раздачи трубной заготовки до начала формования резьбы. Разгрузка, обеспечивающая уменьшение диаметра, должна быть больше разгрузки резьбовой части заготовки.

Для количественного подтверждения этих соображений необходимо определить действующие при образовании резьбы напряжения.

Для этого выполним анализ напряженно-деформированного состояния на основе метода баланса работ внешних и внутренних сил. С учетом незначительного изменения диаметра заготовки в процессе формования резьбы принята схема плоского деформированного состояния, обеспечиваемая отсутствием осевого течения материала при соответствующей конструкции штампа.

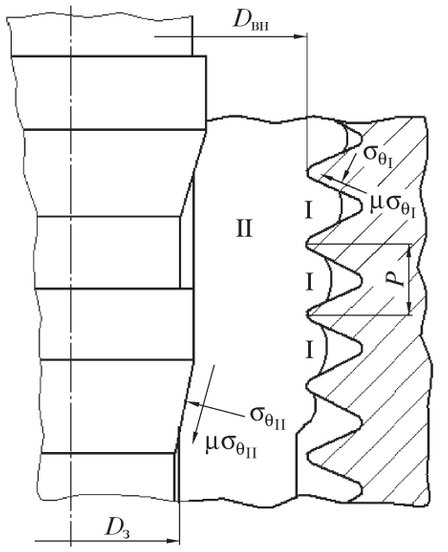


Рис. 2. Схема формования наружной резьбы:
I, II – участки очага деформации; $D_{вн}$ – внутренний диаметр резьбы; $D_з$ – диаметр заготовки; σ_{θ_I}, $\sigma_{\theta_{II}}$ – тангенциальные напряжения; μ – коэффициент трения

Для анализа очаг деформации разделен на два участка (рис. 2):

1) участок непосредственно формования резьбы;

2) участок, передающий давление от инструмента на участок I.

Координатные оси выбраны следующим образом (рис. 3): на участке I приняты тороидальные координаты с центром в вершине угла резьбы α, следовательно, боковые поверхности резьбового профиля являются коническими (винтовыми) поверхностями, а у вершины и впадины резьбы – очерчены радиусами, создающими относительно оси инструмента тороидальные поверхности; две другие границы очага деформации определяются двумя плоскостями, проходящими через ось инструмента (ось приложения силы); на участке II приняты цилиндрические координаты с центром на оси инструмента и тороидальные координаты.

В цилиндрических координатах определяется положение конической деформирующей поверхности общей для инструмента и заготовки и двух плоскостей, проходящих через ось инструмента, остальные поверхности определены тороидальными координатами – поверхность, граничащая с участком I, и две поверхности, определяемые радиусами с центром в вершине угла конусности деформирующей поверхности инструмента. Следовательно, во втором участке

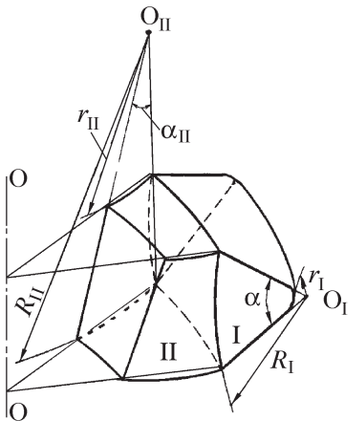


Рис. 3. Элемент пластического деформирования наружной резьбы на трубной заготовке:
О–О – ось пуансона; O_I – центр формирования гребня резьбы, расположенный на окружности центров первой тороидальной поверхности; O_{II} – центр формирования давления, расположенный на окружности центров второй тороидальной поверхности; R_I, R_{II} – радиусы участков очага деформации; r_I, r_{II} – радиусы вершины резьбы

имеем: одну коническую поверхность, две плоскости, три тороидальных поверхности. Напряжения формообразования, действующие в очаге деформации, приведены на рис. 4.

Особенностей составления и решения уравнения, полученного на основе метода баланса работ внешних и внутренних сил с учетом осевой симметрии и плоской деформации, нет. В результате анализа напряженно-деформированного состояния получены выражения для определения напряжения формования резьбы на радиусе R_I:

$$\sigma_I = \sigma_s \ln\frac{R}{r} + \mu\sigma_s\left(1 - 0{,}5\ln\frac{R}{r}\right)\frac{(R-r)}{\alpha R}\left(1+\frac{R}{r}\right) + \frac{\sigma_s}{2}\operatorname{tg}\frac{\alpha}{8}, \quad (1)$$

где σ_s – напряжение течения материала.

Угол конусности конической деформирующей поверхности пуансона:

$$\alpha_{II} = \mu\left(-1+\sqrt{1+\frac{1}{\mu}\left(\frac{\frac{\sigma_I}{\sigma_s}}{1+\frac{D_{вн}-D_з}{4P}}\right)}\right). \quad (2)$$

Определим деформации разгрузки детали, учитывая особенности, обусловленные различными условиями деформирования при раздаче трубы и формовании резьбы. При раздаче трубы осевые сжимающие напряжения в последний момент деформирования равны нулю, поэтому уже к концу раздачи происходит

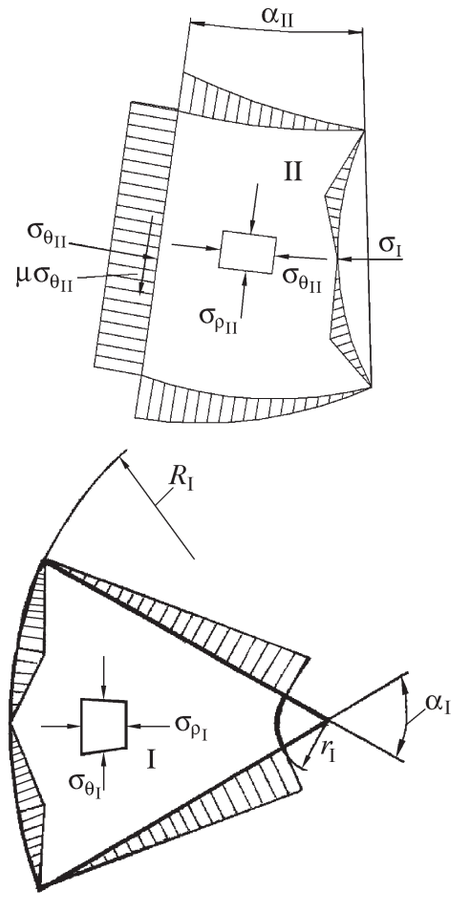


Рис. 4. Схемы очагов деформации и действующих напряжений на участках I и II очага пластической деформации (ось пуансона слева):
заштрихованные участки – предполагаемые эпюры касательных напряжений; σ_I – радиальное напряжение формования резьбы; $\sigma_{\rho I}$, $\sigma_{\rho II}$ – радиальные напряжения

полная разгрузка от действия этих сжимающих напряжений.

Разгрузка от тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^д$, равных напряжению текучести σ_s (на основании условия пластичности), дает деформацию разгрузки (уменьшения диаметра детали):

$$\varepsilon_д = \sigma_s / E, \quad (3)$$

где E – модуль упругости Юнга.

Деформация разгрузки резьбы (на основе закона о разгрузке А.А. Ильюшина):

$$\varepsilon_р = \frac{\sigma_\theta^р - \nu(\sigma_I + \sigma_\theta)}{E}, \quad (4)$$

где $\sigma_\theta^р$ – окружное напряжение формования резьбы:

$$\sigma_\theta^р = \frac{\sigma_I + \sigma_\theta}{2}, \quad (5)$$

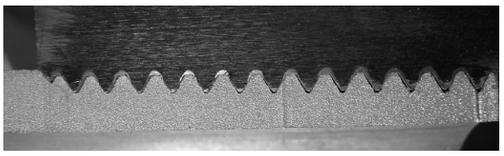


Рис. 5. Опытная резьба на детали, формованная за один рабочий ход коническим пуансоном без кольцевых и спиральных деформирующих поясков

σ_θ – окружное напряжение формования профиля резьбы, определяемое из условия пластичности, равное с учетом знаков

$$-\sigma_\theta = \sigma_s - \sigma_\rho, \qquad (6)$$

ν – коэффициент Пуассона.

Решение, выполненное для наружной резьбы без учета упрочнения материала, дало следующие результаты:

1. Напряжение формования резьбы на входе в резьбовой профиль, т.е. на границе участков I и II очага деформации равно $1{,}61\sigma_s$ при коэффициенте трения $\mu = 0{,}1$. С увеличением μ эта величина почти линейно возрастает.

2. Оптимальный угол наклона деформирующих поясков равен 12,5° и с увеличением толщины заготовки и коэффициента трения он повышается.

3. Осевое напряжение на деформирующем инструменте уменьшается при увеличении трения, уменьшении толщины заготовки. Увеличение угла конусности деформирующего пояска увеличивает это напряжение и силу.

4. Сила формования наружной поверхности на пуансоне при материале заготовки 40ХН, логарифмической степени деформации $e = 1{,}39$ и соответствующему этой деформации упрочнению $\sigma_s = 1150$ МПа (заготовка после отжига при 800 °С в течение 60 мин, диаметр и длина резьбы 60×42 мм) равна:

при одновременном формовании всей резьбы 1870 кН;

при формовании резьбы пуансоном с кольцевыми поясками 430 кН;

при формовании резьбы пуансоном со спиральными поясками 453 кН.

На рис. 5 показана опытная резьба на детали со средним диаметром резьбы 60 мм и шагом 3 мм из алюминиевого сплава АМг, формованная за один рабочий ход коническим пуансоном без кольцевых и спиральных деформирующих поясков.

Альберт Сергеевич Езжев, канд. техн. наук;
Виктор Григорьевич Ковалёв, д-р техн. наук;
Антон Николаевич Лёгких, инженер

И.А. Бурлаков *(филиал "НИИД" ФГУП ММПП "Салют", Москва)*

Особенности изотермической раскатки и ротационной вытяжки заготовок из никелевых сплавов

Рассмотрены методы и схемы формообразования заготовок из труднодеформируемых материалов осесимметричных деталей типа дисков и валов раскаткой и ротационной вытяжкой в изотермических условиях, а также метод повышения стойкости формообразующего инструмента.

Methods and circular blanks shaping from hardly-deformed materials round machine components such as disks and shafts draw and by a rotary drawing in isothermal conditions, and also a method for form tool life increase are considered.

При ротационной обработке с нагревом, как и при любом другом виде обработки, существуют особенности, которые необходимо учитывать при разработке технологических процессов изготовления деталей, проектировании оснастки и инструмента.

Например, при горячей ротационной вытяжке течение материала в тангенциальном направлении значительно большее, чем при холодном формообразовании, что вызывает увеличение диаметра в средней части детали – появление так называемой "бочки", величина которой во многом зависит от режимов деформирования, геометрии рабочей поверхности деформирующего инструмента и оснастки.

Правильный выбор режимов деформирования, геометрии инструмента и оснастки позволяет максимально использовать возможности оборудования и получать качественные детали по 11–12-му квалитетам точности.

Основным видом оснастки при ротационной вытяжке является оправка, на которой заготовку с толстой стенкой деформируют в тонкостенную деталь.

Способ нагрева выбирают с учетом производственных возможностей, физико-механических свойств деформируемого материала и технических требований к детали. Предпочтение отдают такому способу нагрева, который позволяет:

– нагревать заготовки непосредственно в процессе формообразования;

– осуществлять равномерный зональный нагрев перед деформирующим инструментом;

– контролировать и регулировать температуру зоны нагрева в процессе работы;

– вести нагрев и деформирование с высокой скоростью.

Другим способом горячей ротационной обработки металлов давлением является изотермическая раскатка. Оба метода позволяют осуществлять формоизменение труднодеформируемых материалов с большими разовыми деформациями. Данные методы особенно эффективны при изготовлении заготовок дисков и валов газотурбинных двигателей из титановых и никелевых сплавов.

Формообразование ротационными методами заготовок в изотермических условиях осуществляется роликами из жаропрочного сплава ЖС6У в печи с поддержанием температурного поля ±5 °С. Схемы формообразования раскаткой и ротационной вытяжкой показаны на рис. 1 и 2.

Несущественное различие в механических свойствах при температуре деформации заготовки и инструмента приводит к интенсивному износу роликов, изготовленных из сплава ЖС6У в процессе раскатки

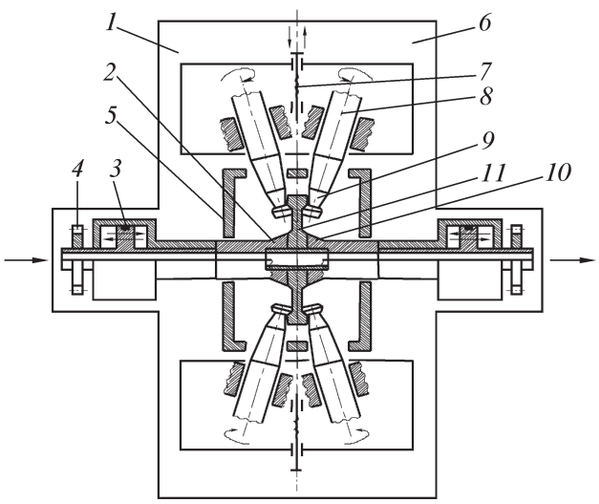


Рис. 1. Схема формообразования раскаткой в изотермических условиях:
1 – станина стана; *2*, *10* – пиноли; *3* – привод осевого перемещения; *4* – привод вращения пинолей; *5* – нагревательная печь нагрева заготовок; *6* – каретка; *7* – привод синхронного перемещения кареток; *8* – шпиндель вращения роликов; *9* – раскатной ролик; *11* – раскатываемая заготовка; → – направление охлаждающего воздуха

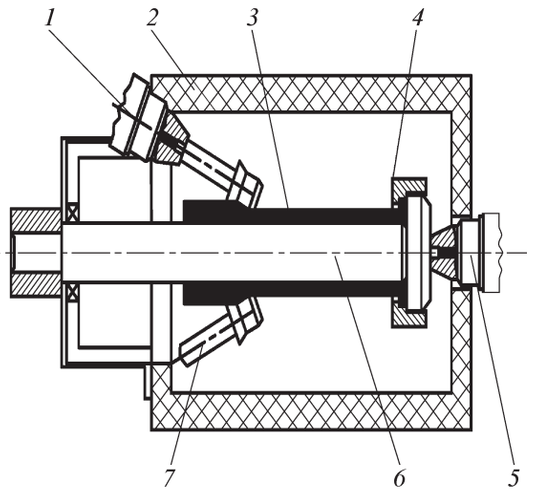


Рис. 2. Схема формообразования ротационной вытяжкой в изотермических условиях:
1, *5* – шпиндель каретки; *2* – печь стана; *3* – заготовка; *4* – накидная гайка; *6* – оправка; *7* – раскатной ролик

дисков и валов из жаропрочных никелевых сплавов. Изменение геометрии инструмента приводит к повышенным затратам на ремонтно-восстановительные работы. Проектирование и изготовление охлаждаемого инструмента позволяет снизить рабочую температуру наиболее нагруженных элементов инструмента, увеличив тем самым стойкость его рабочей поверхности.

Изучение различных методов повышения стойкости раскатных роликов показало, что наиболее простым и надежным способом является их охлаждение в процессе раскатки воздухом на 80...100 °С относительно температуры печи.

Для охлаждения силовых элементов ролика и его рабочей поверхности в роликодержателе с помощью специальных каналов осуществлена циркуляция холодного воздуха (рис. 3).

При раскатке заготовок дисков из никелевых сплавов температура рабочей части роликов должна быть на 80...100 °С ниже температуры печи, что достигают использованием системы воздушного охлаждения. Холодный воздух подводят к раскатной головке через центральное отверстие в каретке, затем воздух охлаждает торцевую крышку и ролик и по специальным каналам в каретке выходит в атмосферу за пределы рабочей печи (см. рис. 3).

Чрезмерное охлаждение повышает стойкость роликов, но приводит к изменению структуры поверхностного слоя раскатываемой заготовки, а недостаточное охлаждение существенно снижает стойкость инструмента. При раскатке заготовок из титановых сплавов стойкость инструмента достаточно высокая и охлаждения инструмента не требуется.

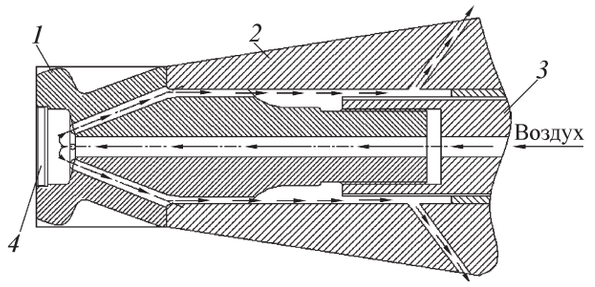


Рис. 3. Схема охлаждения ролика:
1 – ролик; *2* – роликодержатель; *3* – шток; *4* – торцевая крышка

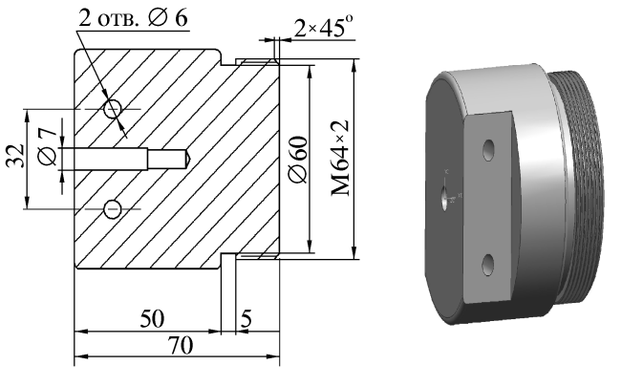


Рис. 4. Калибровочное устройство для настройки объема охлаждающего воздуха

Конструкция должна обеспечивать наиболее интенсивное охлаждение защитной торцевой крышки и формообразующей поверхности роликов, воспринимающих наибольшие механические и термические нагрузки. Настройку расхода охлаждающего воздуха целесообразно осуществлять в стационарном режиме. Взамен торцевой крышки (см. рис. 3) устанавливают специальную пробку, изготовленную из сплава ЖС6У (рис. 4) с отверстием для термопары.

Размеры пробки выбраны исходя из равенства расстояний от торцевой охлаждаемой поверхности до термопары и расстояния от внутренней полости ролика до его рабочей кромки.

Ролик с установленной пробкой и термопарой помещают в рабочую печь стана, которая нагревается до

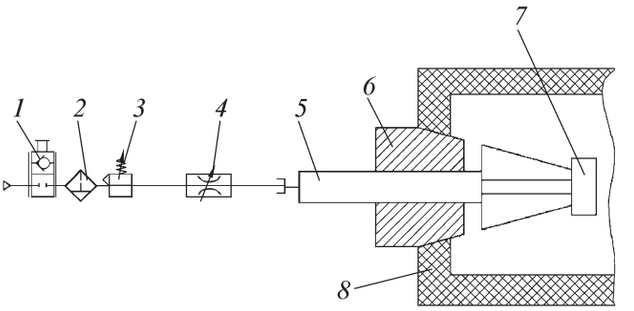


Рис. 5. Система охлаждения роликов:
1 – обратный клапан; *2* – масловлагоотделитель; *3* – регулятор давления; *4* – дроссель; *5* – шток; *6* – роликодержатель; *7* – ролик; *8* – корпус печи

рабочей температуры (около 1080 °С). После выравнивания температуры подается охлаждающий воздух при различных значениях регулятора давления мод. ITV3050-33F4N. По полученным данным строят зависимость температуры ролика от давления, на основе которой задают расход охлаждающего воздуха при раскатке заготовок из никелевых сплавов. Операцию калибровки повторяют для всех роликов.

В магистраль подачи сжатого воздуха для охлаждения роликов установлены следующие приборы (рис. 5): обратный клапан; масловлагоотделитель; регулятор давления; дроссель.

Модернизированная система охлаждения благодаря регулированию расхода воздуха обеспечивает гарантированное охлаждение роликов ориентировочно на 100 °С ниже температуры рабочей печи.

Ввиду того что в процессе формообразования происходит выделение тепла, влияющего на реальную температуру заготовки, был проведен комплекс работ, позволивший осуществить корректировку расхода воздуха, установленного при стационарной калибровке.

Разработанная схема позволила раскатать партию заготовок деталей из никелевых сплавов с заданными свойствами.

Игорь Андреевич Бурлаков, канд. техн. наук

УДК 621.77.4

А.А. Филиппов, К.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин, А.Н. Гущин
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Ресурсосберегающая технология подготовки калиброванного проката под холодную высадку изделий

Показана возможность применения ресурсосберегающей технологии подготовки калиброванного проката, обеспечивающей необходимые механические свойства для последующей высадки из него метизных изделий.

It is shown the opportunity of resource-saving technology application of preparation of the calibrated rolled metal providing high quality and competitiveness of fixing products.

Во многих отраслях машиностроения, потребляющих металлопродукцию, в последние годы достигнуты значительные технические успехи. В связи с этим к металлам, как к основным конструкционным материалам, предъявляются все более высокие требования в отношении прочностных, пластических и вязкостных характеристик, штампуемости, коррозионной стойкости, долговечности, а также новых функциональных свойств. Одновременно усиливается потребность в снижении затрат, экономии материальных и энергетических ресурсов, их оборотном использовании в интересах экономики и решения все более острых экологических проблем.

Важной задачей остается не только обеспечение производства металлопродукции, отвечающей современным требованиям потребителей, но и выпуск перспективных материалов с характеристиками, опережающими достигнутый уровень массового производства и стимулирующими развитие отраслей российской экономики.

Особенно актуальным это является для реструктуризации отраслей машиностроения, поскольку с учетом нынешнего их состояния нужно многое сделать в короткое время, располагая ограниченными ресурсами. Поэтому жизненно важно как можно скорее решить – на основе какой продукции, какого рынка и каких технологий вероятнее всего создание конкурентоспособного в мировом масштабе производства.

Мировое машиностроение за последние три десятилетия претерпело существенные изменения, связанные с уменьшением затрат на производство, снижением отрицательного воздействия на окружающую среду, повышением качества продукции и освоением новых ее видов.

Состояние машиностроения является одним из важнейших индикаторов состояния экономики. Поэтому проблемы машиностроения – это проблемы экономики в целом. Ни одно государство не может иметь эффективную экономику, не имея современного, конкурентоспособного машиностроения.

К числу наиболее ответственных в машиностроении деталей относится крепеж, изготавливаемый методом холодной высадки из калиброванного проката. Как правило, для изготовления крепежа, производимого холодной высадкой, используют конструкционные углеродистые стали с содержанием углерода до 0,5 %. Механические свойства и химический состав сталей данного вида высадки регламентирует ГОСТ 10702–78 (для боросодержащих сталей – ТУ 14-1-4486–88), а отклонения от геометрических параметров – ГОСТ 2590–88. На получение качественного калиброванного проката с заданными техническими параметрами влияют геометрические размеры и механические свойства исходного горячекатаного проката.

К основным требованиям можно отнести оптимальный уровень качества готового проката по механическим свойствам, точности профиля, состоянию качества поверхности, массе бунта, высокий выход годного материала при переработке и многое другое.

На некоторых металлургических заводах для изготовления на проволочных станах катанки из конструкционных сталей с улучшенными механическими свойствами применяют контролируемую прокатку. Контролируемая прокатка позволяет получать горя-

чекатаный прокат в сочетании с оптимальными показателями прочности и вязкости.

В настоящее время существуют усовершенствованные линии двухстадийного охлаждения катанки с измененной конструкцией форсунок водяного охлаждения на первой стадии и участками выравнивания температуры по сечению катанки, что исключает закаливание ее поверхности. Для замедленного охлаждения катанки из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, предназначенных для холодной штамповки, устанавливают специальные крышки. Применение данного вида проката позволяет исключить последующую термообработку при дальнейшем технологическом переделе катанки и улучшить ее механические свойства [1].

Все металлургические заводы изготавливают горячекатаный прокат в основном по геометрическим параметрам согласно ГОСТ 2590–88 обычной точности прокатки – В. Данный стандарт регламентирует отклонение по обычной точности в пределах ±0,3...0,5 мм. Овальность проката не должна превышать 50 % предельных отклонений по диаметру. На ряде металлургических заводов и комбинатов, таких как ОАО "Белорецкий металлургический комбинат", г. Белорецк; РУП "Белорусский металлургический завод", республика Беларусь; ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат"; г. Магнитогорск, ОАО "Оскольский электрометаллургический комбинат", г. Старый Оскол, станы оснащены многоклетьевыми чистовыми блоками и линиями двухстадийного охлаждения катанки. Это позволяет получать готовый профиль с точностью размеров ±0,15 мм при овальности до 0,2 мм. Металлопрокат характеризуется высоким уровнем металлургического качества.

Реализация ресурсосберегающей технологии получения сортового проката для холодновысадочного производства автомобильных заводов, сфероидизированного непосредственно с прокатного нагрева в условиях стана 350 ОАО "ОЭМК", позволяет получать прокат с мелкодисперсной псевдосфероидизированной структурой. По механическим свойствам он не отличается от металлопроката, подвергнутого традиционному печному сфероидизирующему отжигу [2]. Применение высококачественного горячекатаного

1. Качественные характеристики покупного горячекатаного проката ∅ 9,0 мм и калиброванного проката ∅ 7,75 мм

№ п/п	ψ на горячекатаном прокате ∅ 9,0 мм, %	$\sigma_в$ на калиброванном прокате ∅ 7,75 мм, МПа	ψ на калиброванном прокате ∅ 7,75 мм, %	Осадка до 1/3Н на		Допускаемые значения по ТУ 14-1-4488–88 для			
				горячекатаном прокате ∅ 9,0 мм	калиброванном прокате ∅ 7,75 мм	горячекатаного проката ∅ 9,0 мм		калиброванного проката ∅ 7,75 мм	
						$\sigma_в$, МПа, не более	ψ, %, не менее	$\sigma_в$, МПа, не более	ψ, %, не менее
1	58,8	604	61,3	удовл.	удовл.	700	50	750	45
2	57,2	629	60,4	удовл.	удовл.				
3	56,8	601	62,9	удовл.	удовл.				
4	59,5	632	60,5	удовл.	удовл.				
5	57,9	610	61,8	удовл.	удовл.				
6	56,9	632	62,8	удовл.	удовл.				
7	60,1	607	61,2	удовл.	удовл.				
8	57,8	591	63,5	удовл.	удовл.				
9	57,6	606	64,6	удовл.	удовл.				
10	60,5	603	60,3	удовл.	удовл.				
11	59,9	594	63,0	удовл.	удовл.				
12	58,5	599	61,3	удовл.	удовл.				
13	58,0	608	62,6	удовл.	удовл.				
14	59,7	617	63,7	удовл.	удовл.				
15	54,3	603	62,3	удовл.	удовл.				
16	57,4	613	60,3	удовл.	удовл.				
17	60,4	596	61,3	удовл.	удовл.				
18	58,9	619	60,7	удовл.	удовл.				
19	56,4	617	62,3	удовл.	удовл.				
20	57,3	595	64,3	удовл.	удовл.				
21	60,9	596	64,5	удовл.	удовл.				
22	60,5	593	62,2	удовл.	удовл.				

2. Химический состав стали 22MnB4 для горячекатаного проката ∅ 8,5 мм

Химический состав горячекатаного проката, % мас.										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Cu	Al	B	N
0,20 ...0,23	До 0,10	0,85...1,00	До 0,015	До 0,015	До 0,10	До 0,20	До 0,10	0,02...0,05	0,002...0,005	До 0,01

проката с заданными механическими свойствами и высокой точностью позволяет обеспечить экономию металла и снизить себестоимость калиброванного проката на 11...15 %.

Существующая технология изготовления калиброванного проката включает большее число чередующихся операций холодной пластической деформации, термической обработки (рекристаллизационного отжига) и подготовительных (по отношению к деформации) операций. Длительная технология изготовления калиброванного проката повышает его себестоимость, а в ряде случаев снижает качество продукции (увеличивает размер зерна, возрастает глубина обезуглероженного слоя, снижается уровень механических свойств).

Качественные характеристики покупного горячекатаного проката диаметром 9,0 мм из боросодержащей стали марки 20Г2Р, который используется по действующей технологии, приведены в табл. 1. Химический состав стали соответствует ТУ 14-1-4486–88.

Существующая технология производства калиброванного проката из стали марки 20Г2Р диаметром 7,75 мм предусматривает волочение катанки диаметром 9,0 мм на стане ВС-16, сфероидизирующий отжиг в печи с защитной атмосферой и заключительное волочение. Схема подготовки катанки перед первым волочением и после отжига перед вторым волочением предусматривает травление, промывку и фосфатирование.

Применение термообработки для горячекатаного и калиброванного проката перед холодной деформацией направлено на получение необходимых механических характеристик.

Получение с металлургических предприятий высокоточной по геометрическим параметрам катанки с заданными механическими свойствами позволяет во многих случаях решить задачу улучшения качества изготовляемых метизов, расширить возможности производства, создать ресурсосберегающие технологии производства металлопродукции.

Для изготовления калиброванного проката диаметром 7,75 мм предложена новая технология с использованием горячекатаного проката диаметром 8,5 мм из боросодержащей стали марки 22MnB4. Механические свойства и геометрические параметры поставляемого горячекатаного проката оговариваются в контрактном соглашении. Исходная катанка поставлялась с точностью размеров по диаметру ± 0,2 мм, овальностью 0,25 мм, группа осадки 1–66, на поверхности допускались риски глубиной не более 0,1 мм, временное сопротивление разрыву не более 550 МПа, относительное сужение не менее 60 %. Химический состав горячекатаного проката соответствует табл. 2.

На рисунке представлена существующая и предложенная технологии изготовления калиброванного проката.

Горячекатаный прокат, который применялся при упрощенной технологии изготовления калиброванного проката, проходил тщательный входной контроль на соответствие механических параметров, осадке образцов до 1/3Н. Все значения сравнивались с допустимыми значениями.

После калибрования на диаметр 7,75 мм калиброванный прокат также подвергался контролю на соответствие механических свойств, осадке образцов до 1/3Н и полученные значения также заносились в табл. 3. Результаты сравнивались с допускаемыми значениями по ТУ 14-1-4486–88.

В данном варианте изготовления калиброванного проката технологическая цепочка существенно сокращается. Исключается использование термической обработки проката, калибрование проката производится один раз, сокращается число циклов травления и время изготовления калиброванного проката. Себестоимость изготовления снижается до 15 % относительно ранее действующей технологии изготовления калиброванного проката.

Существующая и предложенная технологии изготовления калиброванного проката ∅ 7,75 мм

3. Качественные характеристики покупного горячекатаного проката ∅ 8,5 мм и калиброванного проката ∅ 7,75 мм

№ п/п	$\sigma_в$ на горячекатаном прокате ∅ 8,5 мм, МПа	ψ на горячекатаном прокате ∅ 8,5 мм, %	$\sigma_в$ на калиброванном прокате ∅ 7,75 мм, МПа	ψ на калиброванном прокате ∅ 7,75 мм, %	Осадка до 1/3Н		Допускаемые значения для			
					на горячекатаном прокате ∅ 8,5 мм	на калиброванном прокате ∅ 7,75 мм	горячекатаного проката ∅ 8,5 мм согласно договора		калиброванного проката ∅ 7,75 мм по ТУ 14-1-4486–88	
							$\sigma_в$, МПа, не более	ψ, %, не менее	$\sigma_в$, МПа, не более	ψ, %, не менее
23	523	63,8	644	59,3	удовл.	удовл.	550	60	630	60
24	516	64,2	629	59,3	удовл.	удовл.				
25	517	66,8	631	55,9	удовл.	удовл.				
26	498	65,5	632	59,5	удовл.	удовл.				
27	503	65,9	640	57,8	удовл.	удовл.				
28	560	59,9	692	54 ,8	удовл.	удовл.				
29	498	63,1	647	55,2	удовл.	удовл.				
30	512	65,8	651	59,5	удовл.	удовл.				
31	500	65,6	636	59,6	удовл.	удовл.				
32	503	64,5	643	56,3	удовл.	удовл.				
33	501	62,9	624	58,0	удовл.	удовл.				
34	513	64,1	649	58,3	удовл.	удовл.				
35	528	63,0	668	56,6	удовл.	удовл.				
36	538	59,7	687	57,7	удовл.	удовл.				
37	534	64,3	683	56,3	удовл.	удовл.				
38	536	64,4	663	58,3	удовл.	удовл.				
39	504	64,4	636	58,3	удовл.	удовл.				
40	539	62,9	669	54,7	удовл.	удовл.				
41	537	64,4	687	58,3	удовл.	удовл.				
42	540	63,3	655	58,3	удовл.	удовл.				
43	531	65,8	666	58,3	удовл.	удовл.				
44	506	64,5	643	58,3	удовл.	удовл.				

Выводы

1. Все образцы горячекатаного проката стали марки 22MnB4, выполненные по предлагаемой технологии, после калибрования на ∅ 7,75 мм выдержали испытание на осадку до 1/3Н и признаны годными. Механические свойства калиброванного проката ∅ 7,75 мм соответствуют ТУ 14-1-4486–88.

2. Применение высококачественного горячекатаного проката стали марки 22MnB4 с заданными механическими свойствами и высокой точностью проката позволяет обеспечить экономию металла и снизить себестоимость калиброванного проката от 11 до 15 %.

3. Горячекатаный прокат стали марки 22MnB4 ∅ 8,5 мм пригоден для изготовления калиброванного проката ∅ 7,75 мм по предложенной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Евтеев А.Е., Горбанев А.А., Колосов Б.Н., Юнаков А.М.** Совершенствование технологии производства катанки и режимов работы оборудования стана 150 // Тр. второго конгресса прокатчиков. 1998. С. 286–289.

2. **Бобылев М.В., Королева Е.Г., Штанников П.А.** Перспективные экономнолегированные боросодержащие стали для производства высокопрочных крепежных деталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 5. С. 51–55.

3. **Трусов В.А., Жадан В.Т., Урусова О.В., Смарыгина И.В., Кузнецов В.А., Волосков А.В.** Разработка технологии производства подката с ТМО для фасонных профилей высокой точности // Тр. третьего конгресса прокатчиков. 1999. С. 315–522.

Алексей Александрович Филиппов, инженер;
Константин Германович Пачурин, инженер;
Герман Васильевич Пачурин, д-р техн. наук;
Александр Николаевич Гущин, канд. техн. наук

В.С. Попов, В.Н. Скоробогатых, И.А. Щенкова *(ОАО "НПО ЦНИИТМАШ», Москва)*

Исследование влияния режимов термической обработки на свойства высокохромистых сталей для энергетических установок

Представлены результаты исследования влияния режимов термической обработки на свойства высокохромистых сталей, используемых для изготовления трубопроводов, теплообменного оборудования и роторов турбин с рабочей температурой пара 600...620 °С.

The research results of heat treatment regimes influence on properties of the high-chromium steels used for manufacture of tubings, heat-exchange equipment and turbine rotor with an operating temperature of steam 600...620 °C presented.

Одним из наиболее важных показателей повышения надежности, экономичности, эксплуатационного ресурса и экологических показателей современных тепловых энергоблоков является минимизация отказов и аварий в связи с преждевременным износом, развитием дефектов и разрушением металла основных элементов, прежде всего котельного, паропроводного и турбинного оборудования. Повышение качества и эксплуатационной надежности высоконагруженных элементов теплового энергооборудования приобретает высокую актуальность в связи со значительным моральным и физическим износом основных энергетических фондов, необходимостью их реновации или полной замены на современное оборудование.

Целесообразность реновации существующего оборудования или его полная замена на современное энергооборудование определяется возможностью повышения экономичности энергетических блоков за счет увеличения КПД по электрической и тепловой нагрузке. Основным направлением решения этой задачи является повышение параметров рабочего тела – пара, которые достигают в современных угольных блоках суперсверхкритических параметров (ССКП) порядка 600 °С при давлении 30 МПа, а в новых типах этих блоков – 650 °С и давления до 35 МПа. При этом КПД по электрической нагрузке достигает 46...50 %, в то время как для большинства отечественных энергоблоков высокого давления, эксплуатирующихся при давлении от 10 до 15 МПа и температуре острого пара до 545 °С КПД составляет 32...38 %.

Отечественный и зарубежный опыт, а также современное развитие исследований и разработок показывают, что наиболее перспективными материалами для отечественных элементов перспективных энергоблоков, в том числе паропроводов острого пара и роторов турбин, являются 9...12 %-ные хромистые стали с оптимизированным комплексным легированием. Разработка и оптимизация состава жаропрочной хромистой стали, дальнейшее ее освоение в металлургическом и машиностроительном производстве предполагают решение задач по обеспечению технологичности при выплавке, ковке, сварке, термической обработке наряду с обеспечением заданного уровня характеристик жаропрочности, сопротивляемости высокотемпературному старению, удовлетворительной температуры хрупко-вязкого перехода и другим вопросам, а также задач, связанных с проведением испытаний для определения механических свойств.

ОАО НПО "ЦНИИТМАШ" были разработаны составы и в условиях опытного производства проведены две серии плавок: для роторов турбин (табл. 1) и для труб паропроводов и пароперегревателей (табл. 2).

Термическая обработка должна обеспечить на первом этапе полное растворение фаз в твердом растворе (аустените) с последующим мартенситным превращением с образованием пластинчатого мартенсита. В процессе отпуска должно произойти выделение упрочняющих фаз. Для разработки режимов термической обработки использовался дилатометрический анализ. Критические точки определяли по дилатометрическим кривым, полученным на приборе "Дилатометр "ДМВ-2" при нагреве образцов до температуры

1. Химические составы лабораторных плавок

Номер плавки	Состав	Массовая доля элементов, % мас.										
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	W	V	Nb	Al
1	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,20	3,2	0,40	2,50	0,20	0,06	менее 0,01
	Полученный	0,05	0,08	0,09	10,1	0,03	3,12	0,33	2,53	0,08	0,052	0,006
2	Полученный	0,13	0,07	0,05	9,60	0,08	3,20	0,42	2,42	0,25	0,050	0,007
3	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,20	3,5	1,50	–	0,20	–	менее 0,01
	Полученный	0,13	0,10	0,06	9,85	0,10	3,4	1,57	–	0,24	–	0,006
4	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,20	3,50	0,20	3,00	0,20	0,06	менее 0,01
	Полученный	0,11	0,09	0,05	9,9	0,06	3,55	0,30	3,10	0,20	0,055	0,033
7	Заданный	0,10	менее 0,3	менее 0,4	9,0	менее 0,4	3,0	1,0	1,0	0,20	0,07	менее 0,010
	Полученный	0,11	0,07	0,05	9,0	менее 0,01	2,9	0,9	1,1	0,17	0,07	0,008
19	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,2	3,2	0,4	2,5	0,2	0,06	менее 0,1
	Полученный	0,12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
23	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,2	2,5	0,4	2,5	0,2	0,06	менее 0,05
	Полученный	0,12	0,06	0,05	10,3	менее 0,01	2,45	0,5	2,4	0,18	0,03	–
24	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,2	3,2	0,4	2,5	0,2	0,06	менее 0,05
	Полученный	0,12	0,07	0,04	10,0	0,02	3,2	0,5	2,4	0,20	0,05	–
25	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,2	3,5	0,4	2,5	0,2	0,06	менее 0,05
	Полученный	0,11	0,07	0,04	9,8	0,02	3,5	0,5	2,5	0,20	0,05	–
26	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,2	3,5	0,4	2,5	0,2	0,1	менее 0,05
	Полученный	0,11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
27	Заданный	0,10	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,2	3,2	0,2	2,0	0,2	0,1	менее 0,05
	Полученный	0,11	0,07	0,04	10,1	0,02	3,2	0,2	2,0	0,19	0,08	–
31	Заданный	0,01	менее 0,05	менее 0,08	10,0	менее 0,2	6,0	0,2	3,0	0,2	0,06	менее 0,05
	Полученный	0,009	0,03	0,03	10,0	0,04	6,1	0,2	3,0	0,19	0,03	–

1000 °С с выдержкой 10 мин и последующим охлаждением до комнатной температуры. Нагрев производился со скоростью 500 °С/ч. Значения критических точек приведены в табл. 3.

Повторный нагрев образцов до температуры 700 °С с выдержкой 30 мин и последующим охлаждением до комнатной температуры не выявил каких-либо структурных превращений.

Учитывая наличие в структуре стали значительного количества устойчивых карбидов и карбонитридов, которые необходимо растворить, температура нагрева под закалку для заготовок металла опытных плавок была выбрана значительно выше критической точки Ac_3 – от 1050 до 1080 °С. Выдержка при нагреве под закалку составляла 2...3 ч, охлаждение проводилось на воздухе, что обеспечивало закалку, так как критиче-

2. Химические составы опытных плавок трубных сталей для работы при температуре 650 °С

Номер плавки	Массовая доля элементов, % мас.															
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	W	V	Nb	S	P	B по расчету	N	$Cr_{экв}$	$Ni_{экв}$
4–1	0,10	<0,3	<0,4	9,0	<0,4	–	1,0	1,0	0,20	0,07	0,02	0,02	0,005	0,05	13,09	4,83
4–2	0,08	0,3	0,4	8,5	0,4	–	0,8	0,8	0,15	0,05	0,02	0,02	0,005	0,05	–	–
4–3	0,12	0,3	0,4	10,0	0,4	–	1,1	1,1	0,25	0,10	0,02	0,02	0,005	0,05	–	–
4–4	0,10	<0,03	<0,4	9,0	0,07	–	0,50	2,0	0,20	0,07	0,02	0,02	0,005	0,05	11,61	4,63
4–5	0,10	<0,03	<0,4	9,0	<0,4	3,0	1,0	1,0	0,20	0,07	0,02	0,02	0,005	0,05	11,70	4,58
4–6	0,10	<0,03	<0,4	9,0	<0,4	3,0	–	2,5	0,20	0,07	0,02	0,02	0,005	0,05	12,19	7,69
4–7	0,10	<0,03	<0,4	9,0	<0,4	3,0	–	2,5	0,20	0,07	0,02	0,02	0,015	0,05	12,17	7,62
4–8	0,10	<0,3	<0,4	11,0	–	4,0	1,0	1,2	0,3	0,10	0,02	0,02	0,005	0,04	13,3	8,34
4–9	0,10	<0,05	<0,05	11,0	<0,1	4,0	1,0	1,2	0,3	0,50	0,01	0,01	0,005	0,05	14,05	8,58
4–10	0,10	<0,03	<0,02	11,0	<0,1	3,0	–	2,5	0,2	0,07	0,02	0,02	Тантал 0,16	0,03	13,99	7,18

Примечания:

1. Плавка 4–1 – состав базовый.
2. Плавки 4–2 и 4–3 – предельные композиции базового состава.
3. Плавки 4–1 и 4–4 – влияние комбинации молибден плюс вольфрам.
4. Плавки 4–1 и 4–5 – влияние кобальта.
5. Плавки 4–6 и 4–7 – влияние бора.
6. Плавки 4–8 и 4–9 – проверка композиций, показавших хорошие результаты при температуре 580 °С.
7. Плавка 4–10 – влияние тантала.

3. Критические точки металла исследованных плавок

Номер плавки	Критические точки, °С		
	Ac_1	Ac_3	Мн
1	810	840	375
2	825	865	325

ская скорость закалки в хромистых сталях с образованием пластинчатого мартенсита достаточно мала.

Температура отпуска была принята 700 °С, что на 50 °С выше предполагаемой рабочей температуры и ниже точки Ac_1. Выдержка при отпуске составляла 5...6 ч. Охлаждение после отпуска производилось на воздухе.

Выбор режимов термической обработки стали для трубных систем котлов и паропроводов

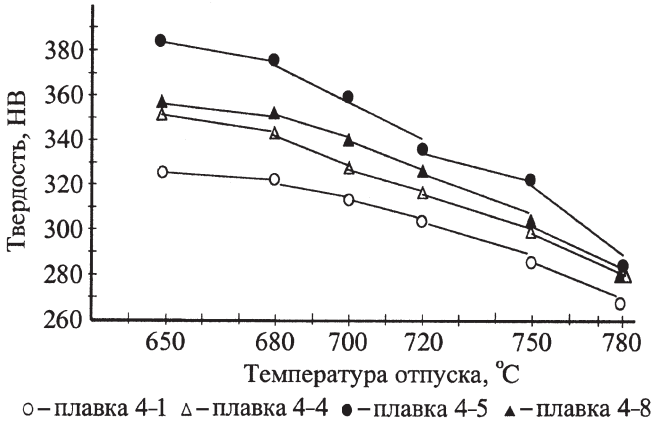
Назначение температуры нормализации опытных образцов производилось с учетом положения критической точки Ac_3 и температуры диссоциации упрочняющих фаз, температуры отпуска (с учетом положения критической точки Ac_1) и оптимального состояния структуры, оцениваемого по кривым изменения твердости в зависимости от температуры отпуска.

Критические точки металла исследованных плавок приведены в табл. 4.

Точки Ac_3, характеризующие окончание $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, для всех исследованных плавок лежат в области температур 880...935 °С, температура диссоциации карбидов $M_{23}C_6 \geq 1000$ °С, NbV(CN) ≥ 1050 °С. Для полной перекристаллизации $\alpha \rightarrow \gamma$, максимального растворения карбидов $M_{23}C_6$ и частичного растворения карбонитридов NbV(CN) достаточна температура аустенизации 1040...1060 °С. Поскольку хромистые стали достаточно хорошо закаливаются на

4. Критические точки металла исследованных плавок

Номер плавки	Критические точки, °С		
	Ac_1	Ac_3	Мн
4–1	850	900	380
4–4	845	905	375
4–5	810	880	385
4–6	845	930	370
4–7	845	935	375
4–8	820	900	350
4–9	820...830	890...910	300...350



Изменение твердости НВ в зависимости от температуры отпуска

воздухе, можно применять режим охлаждения на воздухе, т.е. нормализацию.

Твердость измеряли по Бринеллю на шлифах после нормализации с температуры 1040...1060 °С и отпуска при температурах 650, 680, 700, 720, 750 и 780 °С в течение 3 ч. Полученные результаты приведены на рисунке. Самой низкой твердостью обладал металл плавки 4–1 (9Cr–1Mo–1W–0,2V–0,07Nb–B). После нормализации его твердость составляла 310 НВ, после отпуска при температурах 650...750 °С – 240...206 НВ. Твердость кобальтсодержащих сталей, плавка 4–8 (11Cr–4Co–1Mo–1,2W–0,3V–0,1Nb–B) и плавка 4–5 (9Cr–3Co–1Mo–1W–0,2V–0,07Nb–B) выше: после нормализации – 370 НВ, после отпуска при температурах 650...750 °С – 290–236 НВ. Твердость металла плавки 4–4 (9Cr–2W–0,5Mo–0,2V–0,07Nb–B) близка к твердости металла плавки 4–5.

Исходя из данных, приведенных на рисунке, для отпуска исследуемых плавок наиболее предпочтителен район температур 730...750 °С. Выше температуры 750 °С снижение твердости происходит более резко за счет усиления процессов коагуляции упрочняющих фаз, причем эта закономерность характерна для всех исследованных плавок.

Исследование структуры и основных свойств опытных плавок стали для роторов

В работе проведено качественное и полуколичественное исследования неметаллических включений в литом и деформированном металле и исследование микроструктуры литых образцов.

Материал исследования: три образца, представляющие собой литые пробы высокохромистой стали, отлитые в керамические стаканчики, заформованные в землю, раскисленные по различным вариантам, и три продольных образца после деформации слитков.

Исследование и фотографирование неметаллических включений и микроструктуры проводили на литых и деформированных образцах на микроскопе "НЕОФОТ-30" ("Карл Цейс", Германия), оснащенном телевизионным анализатором изображения.

Микроструктура металла выявлена химическим травлением в специальных реактивах. Оценка загрязненности металла оксидами строчечными (шкала "ОС") проведена по шкалам ГОСТ 1778–70 при увеличении в 100 раз.

Основным видом неметаллических включений в литом нераскисленном металле являются включения хромитов, расположенные равномерно. Кроме того, наблюдаются силикатные включения и хромиты в силикатной оболочке.

В деформированном металле наблюдаются строчки, состоящие из включений хромитов, и отдельные оксидные включения сложного строения, состоящие из частиц хромитов и пластичной силикатной составляющей.

Основными видами неметаллических включений в литом раскисленном металле являются расположенные в виде скоплений включения, по-видимому, глинозема и реже алюмосиликатов и отдельные включения сложного строения (частицы, по-видимому, глинозема в силикатной оболочке).

В деформированном металле в основном отмечены строчки, состоящие из включений глинозема, и отдельные оксидные включения сложного строения, состоящие из частиц глинозема и пластичной силикатной составляющей.

Во всех исследованных образцах размер включений в основном не превышает 7 мкм.

Микроструктуру металла опытных плавок после термической обработки исследовали на микроскопе "НЕОФОТ-30" при увеличении в 400 и 1000 раз.

Микроструктура металла исследованных плавок представляет собой отпущенный пластинчатый мартенсит и равномерно выделившуюся карбидную фазу (предположительно $Me_{23}C_6$) и карбонитриды ниобия и ванадия NbV(CN). Границы зерна тонкие. В просмотренных шлифах структурно-свободного δ-феррита не обнаружено. Микроструктура достаточно однородная. Зерно в плавках 1 и 4 достаточно мелкое, а в плавках 2 и 3 более крупное.

Кратковременные механические свойства при растяжении металла опытных плавок определяли при температуре 20 и 600 °С на образцах с диаметром рабочей части 6 мм. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Ударная вязкость определялась при температурах – 40 и +20 °С на образцах размером 10×10×55 мм с надрезом *KC*V по ГОСТ 9454–78. Полученные результаты приведены в табл. 6.

Металл исследованных плавок в исходном состоянии после термической обработки имеет высокие прочностные и пластические свойства, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу ротора.

5. Механические свойства металла опытных плавок

Номер плавки	$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	$\sigma_в$, Н/мм^2	δ, %	ψ, %
При температуре 20 °С				
1	715	841	17	63
	712	834	17	65
2	852	948	17	65
	871	1013	15	64
3	665	800	15	67
	665	826	17	65
4	781	914	14	62
	793	928	16	65
При температуре 600 °С				
1	432	440	15	74
	473	487	17	72
2	520	527	17	75
	541	555	16	73
3	409	419	18	81
	389	417	20	84
4	478	497	17	80
	492	506	18	80

Полученные значения ударной вязкости всех опытных плавок при 20 °С выше контрольного уровня в 60 Дж/см^2. Есть основания надеяться, что у металла плавок 2 и 4 температура хрупко-вязкого перехода (FATT) будет ниже 20 °С, а плавок 2 и 3 – значительно ниже 0 °С.

Следует обратить внимание на повышение прочностных свойств металла плавки 2 относительно плавки 1. В плавке 2 почти в три раза больше содержание углерода при практически идентичном химическом составе плавок по остальным элементам. Однако при более низком содержании углерода (0,05 %) обеспечивается высокий уровень прочности (от 830 до 840 Н/мм^2). При этом значительно возрастает уровень значений ударной вязкости и снижается порог охрупчивания. Также обращают на себя внимание значения ударной вязкости металла плавки 3, при этом значения прочности также несколько ниже, чем в других плавках. Отличие этой плавки – в отсутствии в составе таких сильных карбидообразующих элементов, как вольфрам и ниобий.

При температуре испытания 600 °С значения прочностных свойств снижаются. Однако их значения остаются на достаточно высоком уровне. Обращают на себя внимание очень высокие значения пластичности металла.

Результаты, полученные на первом этапе работы, подтверждают обоснованность выбранного направления и позволяют рассчитывать на ближайшее решение поставленной задачи – создание материала ротора турбины для работы при температуре 650 °С.

6. Ударная вязкость металла опытных плавок при температурах –40 и +20 °С

Номер плавки	Ударная вязкость *KC*V, Дж/см^2	
	–40 °С	+20 °С
1	42; 26	141; 149
2	10; 15	85; 136
3	124; 70	176; 182
4	11; 24	60; 62

Исследование структуры и основных свойств опытных плавок стали для трубных систем котлов и трубопроводов

Микроструктура металла опытных плавок после нормализации представляет собой мартенсит, содержание δ-феррита не превышает 5 % (в поле зрения видны отдельные зерна δ-феррита небольшого размера); после отпуска – продукты распада мартенсита, т.е. ферритокарбидную смесь. Выделившиеся в процессе отпуска карбидные частицы $M_{23}C_6$ и NV(CN) весьма дисперсны и располагаются как в теле зерна, так и по его границам, создавая прочный каркас из нанофазных включений. Микроструктура кобальтсодержащих сталей плавок 4–5 и 4–8 отличается повышенной дисперсностью и менее сфероидизирована.

Кратковременные механические свойства при растяжении приведены в табл. 7 при весьма высоких значениях характеристик прочности (при 20 °С $\sigma_в$ = = 700...915 Н/мм^2; $\sigma_{0,2}$ = 520...800 Н/мм^2). Разработанные композиции стали на базе Fe–Cr имеют достаточно высокие характеристики пластичности.

Длительность испытаний на жаропрочность составляет 2000...3000 ч, что является недостаточным для прогнозирования на расчетный срок 100 000 ч.

Выводы

1. На основе современных материаловедческих исследований состава и свойств жаропрочных хромистых сталей сформирован комплекс критериальных требований и определены основные направления оптимизации системы легирования и структурного состояния разрабатываемых материалов:

– наиболее эффективными легирующими элементами в отношении ползучести и длительной прочности являются: Mo и W, в суммарном количестве не превышающем 3 %; V и Nb – до 0,35 %; N – до 0,1 %; Co – до 4 %, обеспечивающие создание устойчивой наноструктуры;

– микролегирование бором и такими редкоземельными элементами, как церий, цирконий и др.;

7. Кратковременные механические свойства металла разных плавок

Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	$\sigma_в$, Н/мм^2	δ, %	ψ, %	$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	$\sigma_в$, Н/мм^2	δ, %	ψ, %
	Плавка 4–1				*Плавка 4–5*			
20	520 520	700 705	22,0 21,7	75,0 75,5	610 655	775 805	16,5 17,5	69,5 69,0
450	445 415	520 525	15,5 14,5	76,5 77,0	485 505	560 570	10,5 11,5	72,0 71,5
550	380 375	415 420	27,0 20,5	81,5 81,5	440 435	490 480	13,5 15,0	78,0 80,0
600	345 350	370 365	22,5 17,5	82,5 83,0	385 375	410 405	17,5 18,0	82,5 85,0
650	285 295	300 315	21,3 23,5	88,0 86,5	300 305	325 325	20,0 21,5	87,0 87,0
	Плавка 4–4				*Плавка 4–8*			
20	555 565	710 733	19,5 18,5	74,0 72,5	745 800	880 915	17,0 16,5	67,0 67,5
450	470 460	545 535	14,5 13,0	75,5 71,5	650 640	705 695	13,5 12,0	60,0 57,0
550	420 425	465 465	14,5 20,0	80,0 80,0	530 570	570 610	15,5 18,5	66,0 75,5
600	400 375	420 415	14,5 15,5	82,5 84,0	530 470	550 500	17,5 21,5	71,5 82,5
650	335 320	350 335	27,5 27,5	86,5 86,5	395 375	405 395	26,0 21,5	83,5 83,0

– снижение уровня вредных примесей и остаточного содержания легкоплавких элементов и соединений;

– контроль за содержанием в структуре стали δ-феррита, количество которого не должно превышать 5...10 %.

2. На основании дилатометрических исследований критических точек и кинетики изменения твердости металла опытных образцов определены оптимальные режимы термической обработки сталей на базе Fe–Cr, заключающиеся в нормализации (закалке) при температурах 1040...1060 °С с высоким отпуском при 700...750 °С. Более высокая температура нормализации приводит к росту зерна и образованию δ-феррита, а более высокая температура отпуска – к сфероидизации структуры, потере прочности и являются нежелательными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ТУ 14-3Р-55–2001** "Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов", 2001.

2. **Туляков Г.А. и др.** Конструкционные материалы для энергомашиностроения. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.

3. **Блюм Р. и др.** Новые марки высокотемпературных феррито-мартенситных сталей из США, Японии и Европы // Сб. докл. на Междунар. конф., посвященной оценке остаточного ресурса и продлению срока службы энергоблоков ТЭС, работающих на органическом топливе. М.: ВТИ, 1994. С. 1–27.

4. **Щенкова И.А.** Высокохромистые стали для энергомашиностроения // Теплоэнергетика. 1988. № 7. С. 31–37.

5. **Скоробогатых В.Н., Борисов В.П., Щенкова И.А.** Перспективы совершенствования трубной продукции для изготовления котлов высокого и сверхкритического давления // Теплоэнергетика. № 4. 2001. С. 60–62.

6. **Materials** for Advansed Power Engineering COST 501. Liege, Belgium. Oct. 3–6, 1994. P. 281–290.

7. **Чижик А.А.** Материалы для энергоблоков на суперсверхкритические параметры пара // Тяжелое машиностроение. 1997. № 9. С. 35–37.

8. **Hidehara Nakashima.** Strength and Structure of Heat resisting Steels at High Temperatures // Tetsu to hagane. 2004. T. 90. № 2. P. 23–28.

9. **Arnswald W., Kempkes B., Wellmitz G., Zschau M.** Current and future use of the 9 % Cr Steel X10 CrMoVNb 91for power plant applications // VGB Kraftwerkstechnik. Separate print from English issue. 1994. V. 73. № 3. P. 203–208.

10. **Husemann R.U.** Development status of boiler and piping materials for increased steam conditions // VGB PowerTech. 2003. № 9. P. 124–127.

Владимир Сергеевич Попов, канд. техн. наук;
Владимир Николаевич Скоробогатых, канд. техн. наук;
Изабелла Алексеевна Щенкова, канд. техн. наук

УДК 621.774.37

В.Я. Осадчий, М.А. Бабурин, Е.Г. Екимова *(Московский государственный университет приборостроения и информатики, НИАТ, ОАО "Гос МКБ "Вымпел" им. И.И. Торопова")*

Влияние низких температур на пластичность стали 12Х25Н16Г7АР

Показано, что низкотемпературная обработка в жидком азоте приводит к увеличению пластичности стали 12Х25Н16Г7АР и, соответственно, способствует снижению пружинения при изготовлении W-образных профилей.

It is shown that low-temperature processing in liquid nitrogen increase plasticity of steel 12Kh25N16G7AR and accordingly promotes decrease springback at manufacturing W-shaped profiles.

Сталь 12Х25Н16Г7АР – жаропрочная коррозионно-стойкая аустенитного класса. Химический состав стали 12Х25Н16Г7АР приведен в табл. 1 [1].

Исследование проводили на деталях W-образного профиля, используемых в авиационной промышленности, к которым предъявляют высокие требования по геометрии и точности. Толщина профиля менее 1 мм, внутренний угол при вершине составляет 90° (рис. 1).

Детали изготовляли методом листовой штамповки с помощью двух переходов: непосредственно штамповки и калибровки. Пружинение при штамповке не позволяет получить точных значений угла при вершине профилей, что требует наличия последующих механических операций, направленных на доведение деталей до заданной точности.

На основе данных о положительном влиянии выдержки при низких температурах на свойства различных материалов [2] были проведены эксперименты по выдержке в жидком азоте заготовок W-образных профилей на различных этапах их изготовления.

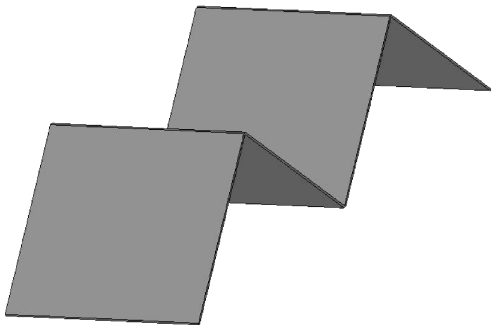


Рис. 1. Схема W-образного профиля

Заготовки опускали в жидкий азот, имеющий температуру –196 °С, который находился в специальной металлической емкости с двойными стенками, изолированными пенопластом. Заготовки выдерживали в течение 10 мин – за это время они успевали принять температуру азота, а затем сразу же подвергали штамповке.

После штамповки измеряли внутренний угол центрального элемента профиля механическим угломером. В экспериментах использовали материал из одной поставки. Результаты исследования сведены в табл. 2.

Результаты экспериментов показали, что выдержка исходной заготовки в жидком азоте перед штамповкой ведет к увеличению внутреннего угла штампованной заготовки в среднем на 2,5 %, т.е. деталь лучше прилегает к матрице, а выдержка штампованной заготовки в жидком азоте перед калибровкой приводит к уменьшению внутреннего угла готовой детали в среднем на 1 %, т.е. раскрытие угла уменьшается. Таким образом, пружинение материала снижается.

Металлографический анализ микроструктуры материала показал, что образцы после выдержки в жидком азоте имеют более мелкое зерно по сравнению с образцами, которые не подвергали выдержке в жидком азоте. Условный средний диаметр зерна в зоне гиба составил для образцов, полученных после выдержки и без выдержки в жидком азоте, соответственно 31,18 и 29,9 мкм.

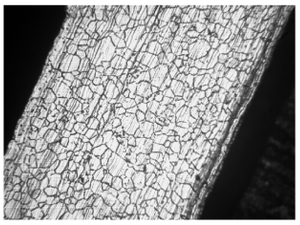
Расчет среднего условного диаметра и оценку геометрии зерна проводили с помощью программного обеспечения для анализа изображений NEXSYS ImageExpert Pro 3, предназначенного для решения

1. Химический состав стали 12Х25Н16Г7АР по ГОСТ 5632–72

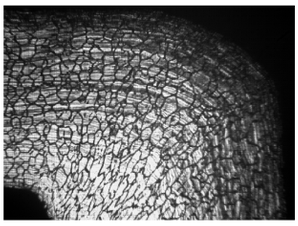
Содержание элементов, % мас.									
C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	B	Cu	N
Не более					Не более				
0,12	1,0	5,0...7,0	23,0...26,0	15,0...18,0	0,02	0,035	0,010	0,30	0,30...0,45

2. Значения внутреннего угла центрального элемента профиля после различных технологических операций

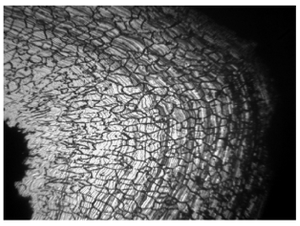
Операция	Внутренний угол центрального элемента профиля
Штамповка:	
образец 1	83° 20′
образец 2	83° 40′
Выдержка исходной заготовки в жидком азоте + штамповка:	
образец 3	85° 30′
образец 4	85° 40′
Штамповка + калибровка:	
образец 5	91°
образец 6	91°
Штамповка + выдержка штампованной заготовки в жидком азоте + калибровка:	
образец 7	90° 10′
образец 8	90° 15′



а)



б)



в)

Рис. 2. Микроструктура образцов, ×100:
а – исходный материал; *б* – образец после штамповки и калибровки (образец 5); *в* – образец после штамповки, выдержки в азоте и калибровки (образец 7)

3. Механические свойства исследованных образцов

Состояние образца	Размер образца, мм	F, мм^2	$P_в$, Н	$\sigma_в$, Н/мм^2	l_0, мм	$l_к$, мм	δ_4, %
Исходное состояние	12,70×0,52	6,60	5700	864	50,0	74,0	48,0
	12,90×0,54	6,97	6010	870	50,0	74,0	48,0
Деформация 1,5 % + выдержка в жидком азоте 10 мин	12,75×0,53	6,76	5980	885	50,0	74,3	48,6
	12,80×0,54	6,91	6000	870	50,0	75,3	50,5
Выдержка в жидком азоте 10 мин	12,80×0,54	6,91	6080	880	50,0	74,8	49,5
	12,80×0,54	6,91	6000	870	50,0	74,7	49,5

Обозначения: F – площадь поперечного сечения; $P_в$ – сила разрыва; $\sigma_в$ – временное сопротивление; l_0, $l_к$ – начальная и конечная расчетная длина образца соответственно; δ_4 – относительное удлинение после разрыва.

стандартных задач количественной металлографии, а в данном случае определения величины зерна в сталях согласно ГОСТ 5639–82.

Анализ геометрии зерна показал, что зерна аустенита в образцах, прошедших обработку жидким азотом, имеют более округлую, т.е. глобулярную форму в сравнении с образцами, которые не подвергали обработке в жидком азоте. Примеры микроструктур образцов приведены на рис. 2.

Механические свойства материала исследовали на стандартных образцах, изготовленных по ГОСТ 11701–84.

Образцы опускали в жидкий азот на 10 мин, затем вынимали и по достижении ими комнатной температуры подвергали испытанию на растяжение на испытательном комплексе Instron 1195. Результаты испытаний сведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что относительное удлинение образцов после выдержки в жидком азоте увеличилось в среднем на 3 % по сравнению с образцами, не проходившими обработку в жидком азоте.

Полученные результаты исследований дают основание предполагать, что выдержка в жидком азоте при температуре, равной –196 °С, образцов из стали 12Х25Н16Г7АР положительно влияет на его пластические свойства и снижает пружинение при изготовлении W-образных профилей вследствие изменения структуры металла, а именно из-за уменьшения размеров зерен аустенита и их стремления к приобретению округлой, т.е. глобулярной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А.** Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

2. **Прочность** материалов и конструкций при низких температурах: сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1990. 250 с.

Владимир Яковлевич Осадчий, д-р техн. наук;
Михаил Аронович Бабурин, начальник научно-производственной лаборатории;
Елена Геннадьевна Екимова, инженер-технолог

УДК 681.3.06

А.В. Филина, И.М. Грядунов *(Орловский государственный технический университет)*

Автоматизация сбора и обработки данных при отрезке заготовок от пруткового материала фасонного профиля

Приведена информация о возможностях контроля процесса отрезки заготовок от пруткового материала фасонного профиля с помощью программных и технических средств, позволяющих автоматизировать сбор и обработку данных на каждом этапе процесса.

The article offered the information on opportunities of blanks process cutoff control from barstock of shaped section by means of software tools and hardware, allowing to automate data acquisition and data processing at each stage of process.

В настоящее время тенденции развития образования и промышленности направлены на извлечение максимальной полезной информации в ходе эксперимента, на более широкое применение цифровых технологий и микропроцессорной техники.

Например, на старом оборудовании, а также оборудовании с аналоговыми устройствами вывода информации измерение каких-либо параметров очень сильно затруднено, либо вообще невозможно. Кроме того, не все стандартные приборы пригодны для точного контроля измеряемых параметров. Помимо этих недостатков отсутствует возможность контролировать сразу несколько параметров и единовременно их обрабатывать.

В современных условиях производства изготовление точных заготовок длиной l меньше параметра h (где h – расстояние между наиболее удаленными противолежащими точками симметричного сечения) от пруткового материала фасонного профиля является одной из реальных проблем процесса отрезки сдвигом.

Проведение более глубоких теоретических и экспериментальных исследований процесса отрезки точных коротких заготовок фасонного профиля $\left(\frac{l}{h}<1\right)$ и разработка на базе результатов исследований технологии и высокопроизводительного оборудования, позволяющих получать изделия, наиболее полно соответствующие предъявляемым требованиям, являются актуальной научно-технической задачей.

В статье представлен проект прибора для автоматизации сбора и обработки данных при отрезке заготовок от пруткового материала фасонного профиля. Лицевая панель разработанного устройства приведена на рис. 1.

Качество изготовления деталей, производительность и стабильность или устойчивость технологических процессов отрезки точных коротких заготовок $\left(\frac{l}{h}<1\right)$ от прутка фасонного профиля зависят от правильного выбора технологических и конструктивных параметров, т.е. получение требуемого эффекта возможно только при оптимальном режиме резки.

Разрабатываемый проект позволит получить наиболее полную и точную информацию о процессах, протекающих при отрезке заготовок от прутка фасонного профиля, а также выбрать наиболее оптимальные режимы и условия работы оборудования.

Лицевая панель прибора разбита на отдельные зоны, каждая из которых содержит приборы, отображающие данные по одному из измеряемых параметров. Для измерения каждого параметра установлены индикаторы реального времени:

– стрелочные индикаторы для следующих параметров: давление масла в цилиндре; операционная сила отрезки; нагрузка на двигателе гидропривода (индикаторы для первых двух параметров имеют стрелки для отображения текущего и максимального значения измеряемого параметра);

– линейный индикатор для отображения линейного перемещения отрезного ножа штампа.

Каждый индикатор реального времени продублирован цифровым индикатором для отображения точного значения измеряемого параметра. Также для индикаторов давления масла в цилиндре и операционной силы отрезки предназначены цифровые индикаторы, показывающие максимальное значение в процессе измерения.

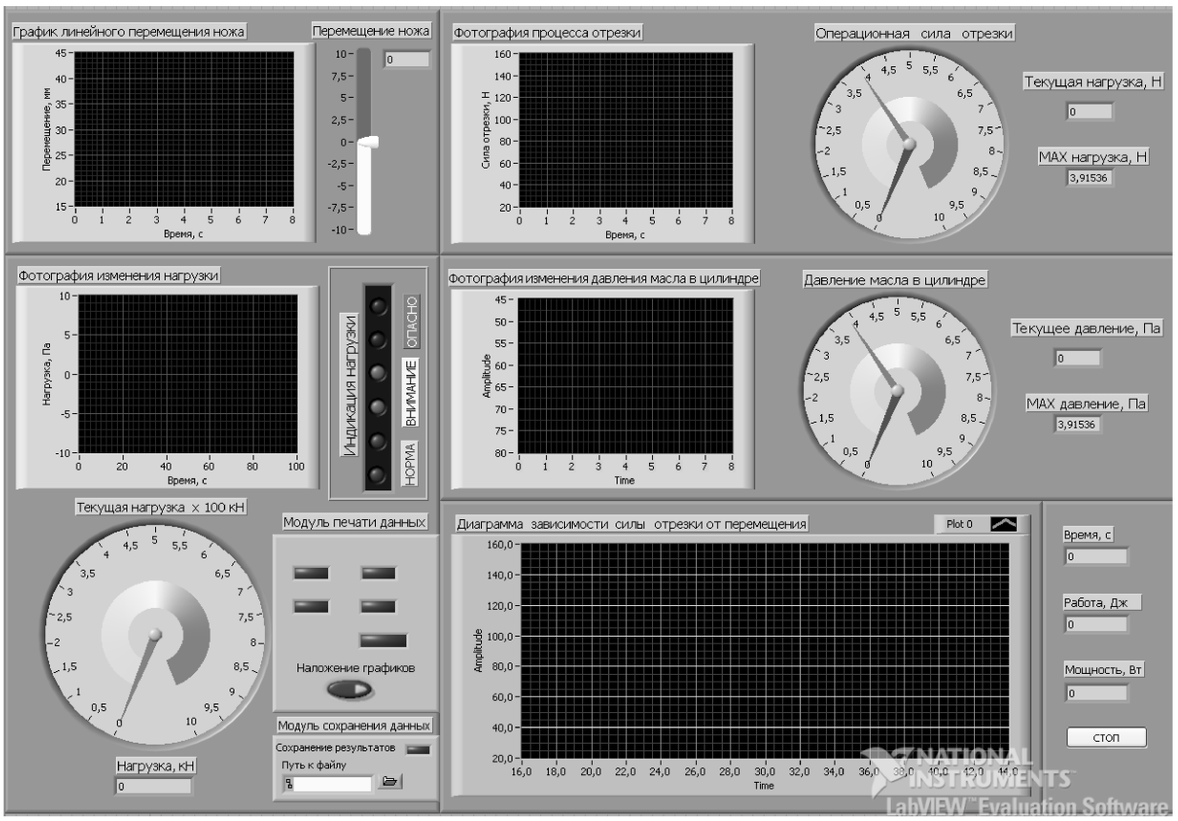


Рис. 1. Лицевая панель разработанного устройства

Для начала реализации разрабатываемого проекта требуется несколько датчиков с электрическим выходом: два тензорезисторных датчика для измерения силы отрезки, датчик давления масла в цилиндре, датчик углового перемещения ротора двигателя гидропривода (энкодер) и датчик линейного перемещения отрезного ножа. Блок-схема устройства для автоматизированного сбора данных приведена на рис. 2.

Принцип работы системы основан на измерении выходного напряжения датчиков и его масштабирование в реальные параметры, отображаемые элементами лицевой панели [1].

Данные, выводимые на приборную панель, получаются расчетным путем.

Для проведения измерений предполагается использовать универсальную гидравлическую испытательную машину МУП-100 с экспериментальной оснасткой для отрезки заготовок от пруткового материала фасонного профиля.

Техническая характеристика МУП-100 с экспериментальной оснасткой для отрезки заготовок от пруткового материала фасонного профиля

Номинальная сила, кН	1000
Высота рабочего пространства между опорными плитами, мм	600
Ширина рабочего пространства, мм	450
Тип силоизмеряющего устройства	Маятниковый гидравлический
Точность силоизмеряющего устройства	± 1 % от измеряемой нагрузки
Габаритные размеры экспериментальной оснастки, мм:	
длина	340
ширина	230
высота	380

Разработанный прибор является универсальным. Его установка возможна на любой гидравлический пресс. Число приборов на лицевой панели определяется конструкцией пресса, структурной схемой технологического процесса, а также индивидуальными пожеланиями конкретного пользователя. По специальному заказу возможна модернизация содержания лицевой панели, ее информативных и потребительских свойств.

Данное устройство позволяет на всем протяжении процесса поперечной отрезки пруткового материала фасонного профиля выполнять "фотографию" во времени основных параметров процесса. Кроме того, стандартное измерительное устройство, имеющее гидравлический привод, является в значительной степени инертным, что не позволяет достаточно точно контролировать силу отрезки прутка на всех стадиях процесса, а также не предусматривает возможности определения времени отрезки.

Предлагаемое устройство лишено указанных недостатков, а также позволяет с достаточной для исследовательских работ степенью точности определять мощность и работу при отрезке, операционную силу и время, линейное перемещение ползуна пресса, давление

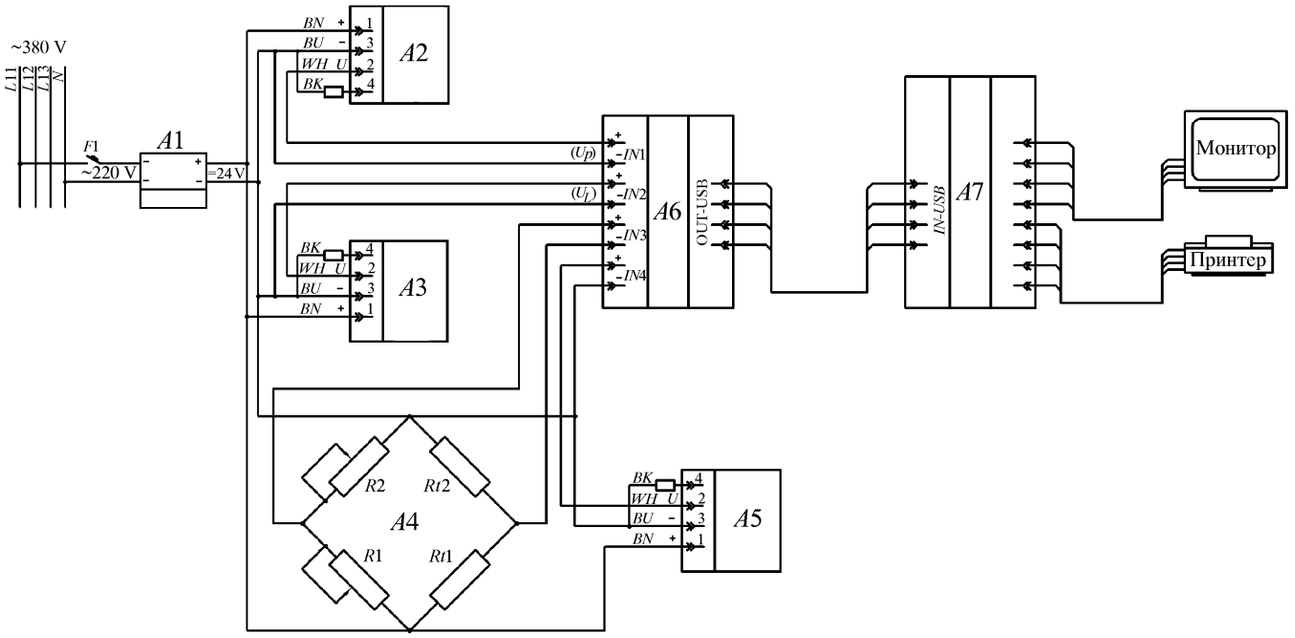


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного сбора и обработки данных при отрезке заготовок от пруткового материала фасонного профиля:

*L*11, *L*12, *L*13 – фазные провода; *N* – нулевой провод; *F*1 – ключ; *A*1 – блок питания (*S* 82*K*-05024 "OMRON"; *BN,* BV – питающий провод на +24 В и –24 В соответственно; *BK* – выходной сигнал; *WH* – выход на плату сбора данных; *U* – выходное напряжение с датчика; *A*2 – датчик давления масла в цилиндре (*PC*160-*G*1/4*A*1M-*LU*8*X*-*H*1141 "TURCK"); *A*3 – датчик линейного перемещения ползуна (*LINE-Q*21-*L*1000 "TURCK"); *A*4 – тензорезисторный мост; *R*1, *R*2, *Rt*1, *Rt*2 – тензорезисторные датчики; U_p, U_L – выходные сигналы платы сбора данных; *IN*1 – *IN*4 – входные каналы платы сбора данных; *A*5 – энкодер ("TURCK"); *A*6 – плата сбора данных *NI* 9215/9215 *A* (*USB*) "NATIONAL INSTRUMENTS"; *OUT-USB*, *IN-USB* – соответственно выход и вход порта USB; *A*7 – системный блок

масла в рабочем цилиндре и нагрузку на двигателе гидронасоса, а также позволяет по результатам измерений составить диаграмму зависимости операционной силы от перемещения рабочего органа пресса.

По завершении каждого процесса отрезки полученные графики по желанию оператора могут быть распечатаны все вместе или в любой комбинации, либо наложены друг на друга (из-за равенства длины временной оси для всех графиков). Результаты измерений можно сохранять в отдельном файле для последующего анализа и систематизации полученных результатов.

Для реализации проекта предполагается использование персонального компьютера INTEL PENTIUM IV с установленной на нем программной средой NI LabVIEW версии 8.20, платы сбора данных типа USB 6251 или выше, тензорезисторных датчиков, датчиков давления масла в рабочем гидроцилиндре пресса, углового перемещения ротора двигателя гидропривода (энкодера) и линейного перемещения отрезного ножа штампа.

В случае расширения границ исследований для проверки параметров математической модели пресса для процесса поперечной отрезки заготовок от пруткового материала фасонного профиля возможно использование в приборе дополнительных датчиков и устройств и их подключение к плате сбора данных.

Программные и технические средства, разрабатываемые компанией National Instruments (США), являются наиболее эффективными для создания систем сбора и обработки данных о состоянии работающей техники.

Среда графического программирования LabVIEW стирает грань между высококвалифицированным программистом и рядовым пользователем, позволяя самостоятельно и в короткие сроки реализовать свои проекты. Удобный и понятный графический интерфейс программы способствует быстрому самостоятельному освоению данного языка программирования в сравнении с другими.

LabVIEW предоставляет пользователю следующие компьютерные приборы: мультиметры, осциллографы, цифровые и аналоговые элементы управления и индикаторы, что влечет снижение затрат на приобретение дорогостоящих цифровых приборов и оборудования и что немаловажно – сохранение полученных результатов в отдельный файл.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тревис Дж.** LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: пер. с англ. Н.А. Клушин. М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2004. 544 с.

Анна Владимировна Филина, канд. техн. наук;
Игорь Михайлович Грядунов, студент

УДК 621.746.74

М.Б. Каменарович *(Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Улучшение прочностных свойств деталей при наложении электромагнитного поля

Исследована возможность улучшения механических свойств толстостенных отливок при действии "бегущего" магнитного поля. Отмечено существенное влияние поля на механические свойства отливок в зависимости от силы электрического тока.

The opportunity of improvement of thick-walled castings mechanical properties under the influence of running magnetic field was investigated. It's shown the great influence of the field on the mechanical properties of castings in dependence of electric current.

Одной из важнейших причин, определяющих неоднородность механических свойств отливок, следует считать образование усадочных раковин и рассеянной усадочной пористости, предупреждение которых позволяет получать отливки высокого качества. Наиболее склонны к образованию усадочных раковин и пор толстостенные отливки, затвердевающие с небольшим перепадом температур по сечению отливки. Поры образуются в объеме жидкого металла, когда выпадающие кристаллы образуют сплошной скелет и прекращается питание той или иной ячейки металлом. Раковина или поры будут тем меньше, чем позже прекратится связь затвердевающего жидкого расплава с источником питания.

Кроме того, характер процесса кристаллизации отливки зависит от интенсивности охлаждения ее в форме. Поэтому один и тот же сплав при разных условиях охлаждения может затвердевать как объемно, так и последовательно. При последовательной кристаллизации пористость значительно меньше, чем при объемной, так как жидкий расплав находится в непосредственном контакте с затвердевающей зоной и, таким образом, наиболее полно и направленно идет процесс затвердевания. Реальные сплавы, затвердевающие в температурном интервале, проходят стадии как направленной, так и объемной кристаллизации вплоть до образования изолированных межкристаллических участков жидкости. Следовательно, в борьбе с объемной усадочной пористостью необходимо стремиться к последовательному затвердеванию, а это зависит от химического состава сплава и скорости охлаждения.

Методика исследований

Установлено, что пористость сплавов тем больше, чем больше интервал температур кристаллизации. Поэтому для снижения усадочной пористости нужно стремиться к интенсификации процесса охлаждения и повышению степени направленности затвердевания, приближаясь тем самым к последовательному характеру затвердевания.

Следует ожидать, что наложение "бегущего" электромагнитного поля, создающего повышенное давление на жидкий расплав в период затвердевания, будет способствовать уменьшению пористости и повышению механических свойств отливок. Для определения влияния поля на механические свойства отливок использовали плиты различной длины и толщины (таблица).

Эскиз формы для заливки плит представлен на рис. 1. Заливка форм производилась при следующих значениях токовой нагрузки:

1-я ступень трансформатора – I = 25 А;
2-я ступень трансформатора – I = 35 А;
3-я ступень трансформатора – I = 45 А.

По длине плит вырезались образцы для механических испытаний. Результаты испытаний и значения предела прочности для плит, залитых с применением электромагнитного поля и без него представлены на рис. 2–4.

Как следует из приведенных графиков, характер распределения прочности по длине отливок, залитых с применением поля и без него, существенно отличается. Наименьшее значение предела прочности образцов, вырезанных из отливки, залитой с применением поля для токовой нагрузки 25 и 35 А находятся недалеко от края отливки и соответствует зоне образования усадочных дефектов, в то время как для отливок, залитых без использования поля, эта зона находится в середине отливки. Следовательно, можно считать, что усадочная пористость в отливках, залитых в магнитно-гидроди-

Размеры, мм, опытных образцов плит из сплава АК7ч (АЛ9)

Ширина	Длина	Толщина
200	500	25
200	500	30
200	500	40
200	200	25
200	700	80

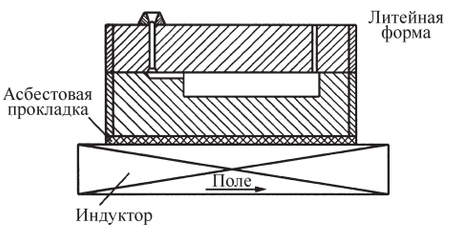


Рис. 1. Эскиз опытной формы

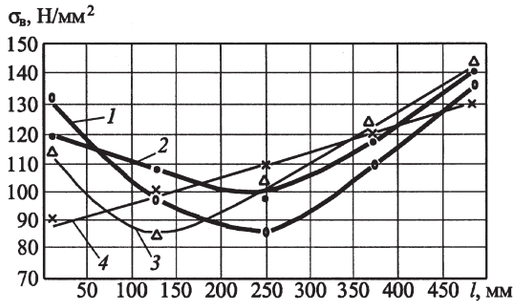


Рис. 2. Изменение значений временного сопротивления на разрыв по длине образца размером 25×200×500 мм при различных значениях токовой нагрузки: *1 – I* = 0; *2 – I* = 25 А; *3 – I* = 35 А; *4 – I* = 45 А

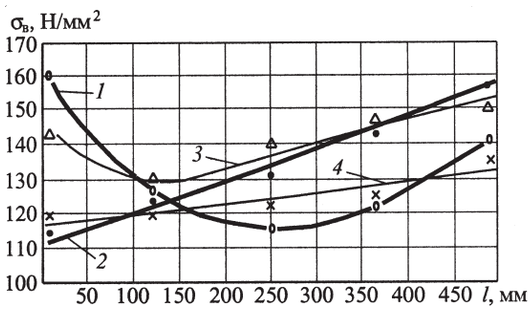


Рис. 3. Изменение значений временного сопротивления на разрыв по длине образца размером 40×200×500 мм при различных значениях токовой нагрузки: *1 – I* = 0; *2 – I* = 25 А; *3 – I* = 35 А; *4 – I* = 45 А

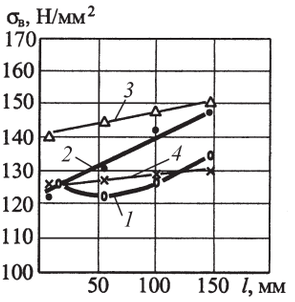
намических формах (МГД-формах), смещается в направлении, обратном действию электромагнитных сил. Таким образом, при применении МГД-форм существует возможность получения отливок без усадочных пустот и значительно уменьшенной рассеянной усадочной пористости за счет вытеснения их в прибыли или в неответственные части отливки.

Следует отметить, что с ростом токовой нагрузки до 45 А распределение значений предела прочности по длине отливки носит линейный характер, и численные значения предела прочности начинают снижаться по сравнению с соответствующими значениями для образцов, залитых при значениях тока 25 и 35 А. Такое явление объясняется повышенной скоростью заполнения литейной формы и значительным перемешиванием расплава, что препятствует удалению газов. Результаты рентгенопросвечивания пластин размером 25×200×500 мм показали, что при токе 45 А рассеянная усадочная пористость увеличивается, что подтверждает сделанные ранее выводы.

Представляло интерес проследить за распределением значений предела прочности образцов для пластины, имеющей размер 80×200×700 мм, залитой в форму, представленную на рис. 1. Схема вырезки образцов из такой пластины показана на рис. 5.

Результаты измерения прочности по длине плит, полученных в поле и без поля, представлены на рис. 6. Показательно, что смещение значений предела прочности характерно для каждого слоя опытной отливки. Выборочное определение удельного веса образцов, вырезанных из плит, методом гидростатического взвешивания дало противоречивые результаты.

Рис. 4. Изменение значений временного сопротивления на разрыв по длине образца размером 25×200×200 мм при различных значениях токовой нагрузки: *1 – I* = 0; *2 – I* = 25 А; *3 – I* = 35 А; *4 – I* = 45 А



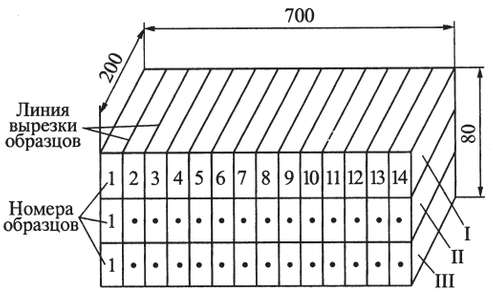


Рис. 5. Схема вырезки из отливки образцов размером 80×200×700 мм

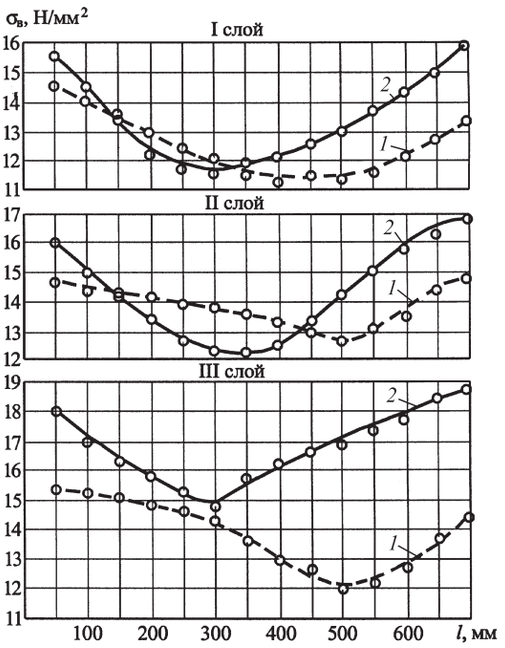


Рис. 6. Изменение значений временного сопротивления на разрыв по длине и толщине образца размером 80×200×700: *1 – I* = 0; *2 – I* = 25 А

Вывод

Таким образом, экспериментально подтверждено, что наложение "бегущего" электромагнитного поля существенно влияет на прочностные характеристики кристаллизующегося металла.

Михаил Борисович Каменарович, канд. техн. наук

Решение Совета директоров предприятий кузнечно-прессового, литейного машиностроения и заготовительных производств – членов Российской Ассоциации "Станкоинструмент"

г. Рязань, ОАО "Тяжпрессмаш", 8 ноября 2007 г.

На Совете присутствовали генеральные директора, главные инженеры, другие руководители предприятий и организаций – члены Ассоциации "Станкоинструмент": С.В. Керницкий (ОАО "Алтай Пресс", г. Барнаул), А.М. Володин, Ю.И. Каукин (ОАО "Тяжпрессмаш", г. Рязань), А.Ю. Петров (Рэлтек, г. Екатеринбург), К.Ф. Паученков (Центросвармаш, г. Тверь), В.Ф. Вергай ("Сиблитмаш", г. Новосибирск), С.С. Ткаченко (Союз литейщиков Санкт-Петербурга), А.Н. Колесов (НПО "Уральские технологии", г. Екатеринбург), В.А. Головлев (Машлизинг, г. Москва), редакторы технических журналов Е.А. Петрова (Кузнечно-штамповочное производство), Н.В. Дюбкова (Заготовительные производства в машиностроении), д.т.н. Ю.А. Зимин (МГВМИ), д.т.н. А.Э. Артес (МГТУ "Станкин"), А.И. Волохин, А.А. Наумов (Ассоциация "Станкоинструмент").

Повестка дня

1. Об экономических результатах деятельности предприятий кузнечно-прессового, литейного машиностроения и заготовительных производств за 9 месяцев 2007 г. и мерах по увеличению роста производства и улучшению экономических показателей в 2008 г.

2. О состоянии работы по повышению технического уровня и организации комплексных поставок (поставок технологий, оборудования в комплекте с штамповой оснасткой) выпускаемого кузнечно-прессового, литейного и другого оборудования и первоочередных задачах руководителей предприятий в этом направлении.

3. Об участии предприятий комплекса в Международной выставке "Металлообработка – 2008" (26–31 мая 2008 г., ЦВК "Экспоцентр" на Красной Пресне, г. Москва) и Международной выставке по листообработке "EUROBLECH" (21–25 октября 2008 г., г. Ганновер, Германия).

4. Об опыте работы коллектива ОАО "Тяжпрессмаш" по повышению объемов и экономической эффективности производства, организации комплексных поставок тяжелого кузнечно-прессового оборудования и другой наукоемкой продукции.

Обсудив данные вопросы, Совет директоров отметил, что в России на сегодняшний день наметилась тенденция к незначительному росту производства кузнечно-прессовых машин (КПМ). В 2001–2003 гг. производство КПМ находилось на уровне 1650–1700 шт в год, в 2004 г. – 1564 шт, в 2005 г. – 1503 шт, в 2006 г. выпущено 1996 шт КПМ или 132,8 % к уровню 2005 г.

По предприятиям кузнечно-прессового машиностроения – членам Ассоциации "Станкоинструмент" выпуск КПМ за 9 месяцев 2007 г. составил 703 шт или 116,8 % к соответствующему уровню 2005 г.

Наибольший рост объемов производства обеспечили ОАО "Алтай Пресс" – 194,0 %, ОАО "Долина" – 133,0 %, ЗАО "Нелидовский завод ГП" – 236,8 %, ОАО "Тяжпрессмаш" – 132,3 %, ОАО "Сальский завод КПО" – 233,9 %.

По предприятиям литейного машиностроения объемы производства к уровню 2006 г. составили: по ОАО "Сиблитмаш" – 111,1 % и ООО "Завод "Амурлитмаш" – 175,2 %. Эти предприятия увеличили в 2007 г. выпуск литейных машин (ЛМ) против соответствующего уровня 2006 г. в количественном отношении на 114,5 %.

В 2006 г. экспорт КПМ из России составил 982 шт на сумму 54,4 млн долларов США или 73,8 % по количеству и 125,9 % по стоимости к 2005 г. Наибольшее количество поставлено гибочных (485 шт) и гидравлических (129 шт) машин.

Импорт составил 7185 шт КПМ на сумму 233,4 млн долларов (рост к уровню 2005 г. по количеству составил 139,7 %, по стоимости – 103,5 %). Основной объем импорта составили ковочные машины (512 шт), гибочные машины (2299 шт), пресс-ножницы (1163 шт), различные пробивные машины по листу (357 шт). Гидравлических прессов было ввезено 1489 шт.

Основными причинами недостаточно высоких темпов увеличения производства КПМ являются продолжающиеся кризисные явления в машиностроительном комплексе страны и, как следствие, незначительный спрос на металлообрабатывающее оборудование, а также увеличивающийся импорт в страну станочного и кузнечно-прессового оборудования западными фирмами.

Существуют также и внутренние причины самих предприятий: выпуск устаревшей и недостаточно производительной, а в некоторых случаях и недостаточно качественной продукции, недостатки в организации производства и режимах экономии материалов и энергоресурсов, что не приводит к желаемому снижению цен на отечественные КПМ и устойчивости их на рынках. Требуют улучшения постановка маркетинговых исследований рынка, а также работа с крупными машиностроительными предприятиями, осуществляющими зачастую техническое перевооружение своих производств преимущественно западным оборудованием.

Совет директоров отметил начало работ по реализации на предприятиях 2–3-летних планов создания новых видов кузнечно-прессового, литейного оборудования, а также утверждение 28 июня 2006 г. Советом директоров Ассоциации "Станкоинструмент" "Рекомендаций по освоению новых перспективных технологических процессов в области обработки металлов давлением (ОМД) и созданию и производству по ним новых видов кузнечно-прессового оборудования".

В то же время следует признать, что процесс обновления номенклатурного ряда, повышения технического уровня выпускаемых КПМ проходит крайне медленно, что и является основной причиной повышенного интереса отечественных машиностроительных предприятий – потребителей к импортному оборудованию.

Немаловажной причиной непопулярности отечественного кузнечно-прессового оборудования является также отсутствие у предприятий – изготовителей КПО конкретных технологий и возможностей обеспечения своего оборудования штамповой оснасткой для изготовления конкретных заготовок. Пока только одно предприятие, ОАО "Тяжпрессмаш", решило задачу комплексной поставки оборудования. Все выпускаемое этим заводом тяжелое кузнечно-прессовое оборудование продается с разработанной технологией и оснащается штамповой оснасткой, спроектированной и изготовленной также на заводе. Передача оборудования покупателю происходит, как правило, после

выпуска партий заготовок заказчика непосредственно в сборочном цехе ОАО "Тяжпрессмаш".

Большую роль в реализации планов новой техники может сыграть намечаемая помощь от государства при реализации федеральных программ в рамках разработанной и рассматриваемой в настоящее время Правительством Российской Федерации "Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2015 года". Значительные средства (до 4 млрд рублей) для модернизации выпускаемой станкоинструментальной продукции намечены бюджетом Союзного государства Россия – Беларусь.

Совет директоров отметил положительный опыт коллектива завода по созданию и производству модернизированного тяжелого кузнечно-прессового оборудования: автоматических линий на базе многопозиционных горячештамповочных автоматов по производству заготовок колец подшипников, автоматических линий на базе горизонтально-ковочных машин (ГКМ) с горизонтальным разъемом матриц по выпуску штанг глубинных насосов, автоматизированных гидравлических прессов для штамповки заготовок типа "стакан".

В последние годы неоднократно положительно оценивается появляющийся опыт хозяйствования в рыночных условиях ОАО "Тяжпрессмаш", ОАО "Сиблитмаш" по диверсификации, организации производства сложной наукоемкой продукции: на первом заводе это свыше 200 наименований буровой техники для нефтегазовой промышленности, на втором – выпуск чугунной фасонной арматуры и оборудования для коксохимической промышленности и различных шахт. В настоящее время такой опыт появился и в ОАО "Алтай Пресс", где на базе высокоэффективного оборудования фирмы "Трумпф" создан Сибирский региональный центр листообработки.

Совет директоров РЕШИЛ:

1. Рекомендовать генеральным директорам предприятий кузнечно-прессового, литейного машиностроения и заготовительных производств обеспечить в 2008 и последующих годах рост объемов производства, выпуска кузнечно-прессовых и литейных машин, эффективности производства, используя по примеру ОАО "Тяжпрессмаш", ОАО "Сиблитмаш", ОАО "Алтай Пресс" такие инструменты хозяйствования, как диверсификация производства, постановка на производство новой наукоемкой, пользующейся спросом продукции. Оставлять при этом в сохранности производственные мощности и подготовленные рабочие и инженерные кадры для выпуска основной номенклатуры изделий.

2. Одобрить опыт ОАО "Тяжпрессмаш" работы в условиях рынка: по увеличению объемов производства на базе выпуска пользующейся спросом наукоемкой продукции, комплексной поставке тяжелого КПО (с разработанной технологией и штамповой оснасткой для изготовления заготовок заказчика), резкому повышению эффективности производства на основе использования прогрессивных нововведений и повышению на этой основе благосостояния трудового коллектива.

3. Для повышения конкурентоспособности, потребительских свойств и качества отечественного кузнечно-прессового, литейного оборудования считать первоочередной и приоритетной задачей каждого руководителя предприятия обеспечение на основе достижений науки и техники высокого технического уровня выпускаемой продукции.

Считать необходимым в этих целях проведение на предприятиях планомерной модернизации и обновления выпускаемого кузнечно-прессового, литейного и другого оборудования. Использовать при этом утвержденные 28 июня 2006 г. Советом директоров Ассоциации "Станкоинструмент" "Рекомендации по освоению новых перспективных технологических процессов в области обработки металлов давлением (ОМД) и созданию и производству по ним новых видов кузнечно-прессового оборудования".

Рекомендовать генеральным директорам пересмотреть в сторону увеличения и улучшения в качественном отношении имеющиеся 2–3-летние (на 2006–2008 гг.) планы создания новой техники и разработать планы создания новых видов оборудования на период 2008–2012 гг., в том числе для машиностроения. Полнее использовать возможности Ассоциации "Станкоинструмент" по включению планов НИОКР предприятий в различные государственные программы финансирования. О новых разработанных планах на период 2008–2012 гг. в срок до 1 апреля 2008 г. проинформировать (прислать копии планов) Ассоциацию "Станкоинструмент".

Рекомендовать аппарату Ассоциации "Станкоинструмент" усилить помощь предприятиям по включению планов НИОКР в различные государственные программы финансирования.

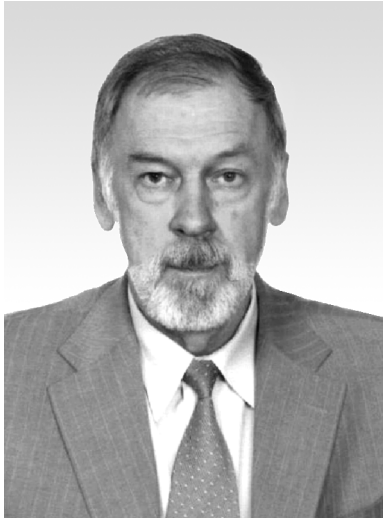
4. Рекомендовать руководителям предприятий использовать возможности кафедр российских технических вузов, в первую очередь МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ "Станкин", МГВМИ и других ведущих вузов при модернизации и создании новых видов оборудования, организовывать взаимодействие собственных конструкторских служб и научных работников вузов.

5. Считать одной из приоритетных целей предстоящего периода 2008–2010 гг. задачу организации на каждом предприятии кузнечно-прессового машиностроения комплексной поставки оборудования. В этих целях разработать и реализовать мероприятия с тем, чтобы уже в 2008 г. приступить к созданию технологических, конструкторских подразделений и производственных участков для обеспечения по заказам покупателей выпускаемого КПО технологией и штамповой оснасткой.

6. Рекомендовать руководителям предприятий кузнечно-прессового машиностроения принять активное участие в коллективной экспозиции Российской станкоинструментальной отрасли на 10-й Международной выставке "Металлообработка – 2008" (26– 31 мая 2008 г., ЦВК "Экспоцентр" на Красной Пресне, г. Москва), а также организовать поездки специалистов с помощью Ассоциации "Станкоинструмент" на выставку по листообработке "EUROBLECH" (г. Ганновер, 21–24 октября 2008 г., Германия).

7. Руководителям предприятий ознакомить с настоящим решением руководящих работников, специалистов экономических, конструкторских и технологических служб своих предприятий, организовать обсуждение и реализацию его положений.

Председатель Совета директоров предприятий
кузнечно-прессового, литейного машиностроения
и заготовительных производств
Ассоциации "Станкоинструмент",
ген. директор ОАО "Тяжпрессмаш" **А.М. Володин**,
Секретарь Совета директоров **А.И. Волохин**



Поздравляем!

Николая Александровича Шестакова

доктора технических наук, профессора

с 60-летием

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

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

С 1979 г. и по настоящее время Николай Александрович работает в Московском государственном индустриальном университете. В 1981 г. ему было присвоено ученое звание доцента по кафедре "Машины и технология обработки металлов давлением".

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

Многолетняя трудовая деятельность Н.А. Шестакова связана с научно-педагогической деятельностью. Проф. Н.А. Шестаков читает курсы лекций "Теория обработки металлов давлением", "Теория процессов пластической деформации", "Технология листовой штамповки". Он является автором учебного пособия "Технология ротационной ковки и вальцовки", выпущенного в двух изданиях "Высшая школа" (1982 и 1988 гг.). Издательством МГИУ в 2008 г. выпущено третье издание его учебного пособия "Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad. Решение задач энергетическим методом".

Н.А. Шестаков – автор более 90 научных и учебно-методических работ, а также 14 авторских свидетельств и патентов России. Основные научные интересы Н.А. Шестакова – теория прогнозирования предельных параметров деформации, теория процессов комбинированного деформирования и нагружения и теория технологической наследственности, связанная с формированием деформационной анизотропии при обработке материалов с необратимой сжимаемостью.

Проф. Н.А. Шестаков ведет большую учебно- и научно-организационную работу, является деканом Автомобильного факультета МГИУ.

Награжден золотой (1987 г.) и серебряной (1991 г.) медалями ВДНХ СССР.

Коллектив редакции и редакционная коллегия поздравляют
Николая Александровича Шестакова с юбилеем!
Желаем нашему постоянному автору доброго здоровья
и дальнейших творческих успехов на благо нашей Родины!

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**,
107076, Москва, Стромынский пер., 4/1, стр. 3
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
E-mail: zpm@mashin.ru
Телефоны редакции журнала: (495) 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 28.12.07 г. Подписано в печать 18.02.08 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,20. Заказ 145. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ОАО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.