ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 6 июнь 2007

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.
БЕЛАВЕНЦЕВ Р.Ю.
СЕРИКОВА Е.А.

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

Иванов С.Я., Рыбкин В.А. Особенности изготовления ювелирных отливок 3
Сплавы магниевые литейные по ГОСТ 2856–79 6
Балановский А.Е. Плазменные технологии в промышленности: состояние и перспективы 9

Кузнечно-штамповочное производство

Горьков М.А., Власов А.В. Гибка малопластичных металлов на малый радиус . . 15
Илинич А.М., Головащенко С.Ф. Влияние технологических параметров обрезки на предельную деформацию удлинения высокопрочных листовых двухфазных сталей 18
Абрамова Н.Б., Григорьев Д.С. Нагрев заготовок из меди для ковки труб протяжкой на оправке 24
Ковалёв В.Г., Рыбаков А.В. Автоматизация проектирования технологических процессов листовой штамповки. Часть 1. Основы создания САПР. *(Продолжение)* 26

Прокатно-волочильное производство

Шеногин В.П., Покрас И.Б., Тепин Н.В., Храбров В.А., Чучалов М.В. Исследование области внеконтактных деформаций при производстве гнутых гофрированных профилей 33
Арсентьева Н.С., Железняк Л.М., Снигирев А.И., Кузьмина Е.В., Глухова О.Л. Освоение производства бронзовых полуфабрикатов широкого сортамента для машиностроения на ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов" 35

Материаловедение и новые материалы

Петраков О.В., Поддубный А.Н., Тупатилов Е.А. Влияние содержания хрома на структуру белых легированных чугунов в биметаллических отливках 38
Алешина Е.А., Иванов Ю.Ф., Колубаев А.В., Сизова О.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. Особенности формирования структуры и фазового состава поверхности стали Гадфильда при трении 41

Информация

Паринов М.В., Чижова Е.М. Гальваномеханическое хромирование с адаптивной коррекцией режимов обработки 44
Матвеев Б.Н. Новые виды материалов и заготовок для автомобилестроения (обзор зарубежной и отечественной литературы) 47
Павеле Л.А. Выбор оптимального способа термической резки металлов 52

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.

© ОАО "Издательство "МАШИНОСТРОЕНИЕ", "Заготовительные производства в машиностроении", 2007

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 6 June 2007

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.
BELAVENTSEV R.Yu.
SERIKOVA E.A.

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

Ivanov S.Ya., Rybkin V.A. Particularities of jewel castings manufacture 3
Casting magnesium alloys by GOST 2856–79 6
Balanovsky A.E. Industrial plasma technologies: current status and future trends . . . 9

Forging and Stamping Productions

Gorkov M.A., Vlasov A.V. Bending of low-plastic materials on a small radius 15
Ilinich A.M., Golovashenko S.F. Influence of cutting technological parameters on stretch ultimate strain of high-strength two-phase steels 18
Abramova N.B., Grigoriev D.S. Heating of copper billets for the tubes forging by mandrel working 24
Kovalev V.G., Rybakov A.V. Automation of designing of sheet stamping technological processes. Part 1. Basics of CAD/CAE creation. *(Continuation)* 26

Rolling and Drawing Productions

Shenogin V.P., Pokras I.B., Tepin N.V., Khrabrov V.A., Chuchalov M.V. Researches of non-contact deformations area during bending of channeled sheets . . 33
Arsentieva N.S., Jeleznyak L.M., Snigirev A.I., Kuzmina E.V., Glukhova O.L. Productions of wide range of the base bronze semiproducts for machine-building on the JSC "Kamensk-Uralsky non-ferrous metal working plant" 35

Physical Metallurgy and New Materials

Petrakov O.V., Poddubny A.N., Tupatilov E.A. Chrome content influence on the structure of white irons in bimetallic castings 38
Aleshina E.A., Ivanov Yu.F., Kolubaev A.V., Sizova O.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. Particularities of the Hadfield steel structure and phase compound forming during friction 41

Information

Parinov M.V., Chizhova E.M. Technology of galvanic-mechanical chromium-plating with adaptive correction of process rates 44
Matveev B.N. New types of materials and blanks for the motor-car construction (foreign and domestic press review) 47
Pavele L.A. Optimum way of the metal's thermal cutting 52

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of thesises for competition the academic degrees

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2007

С.Я. Иванов *(ООО "Адамас" – столичный ювелирный завод", Москва),*
В.А. Рыбкин *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Особенности изготовления ювелирных отливок

Рассмотрена технология изготовления ювелирных изделий в условиях серийного производства. Показано, что наиболее приемлемым способом литья является литье по выплавляемым моделям. Несмотря на длительность и многооперационность, этот способ обладает высокой эффективностью и обеспечивает низкий уровень брака.

The paper considers the technology of jewel castings manufacture in the conditions of repetition work. It is shown that the optimal way of casting is the lost wax casting.

Способы ювелирного литья отличаются спецификой от других литейных технологий и малым числом научно-технических публикаций. Это обусловлено отчасти и коммерческими тайнами.

Развитие ювелирной промышленности во всем мире привело к внедрению новых технологий и оборудования, заимствованных от других производств. В Европе стараются автоматизировать процесс изготовления ювелирных изделий. В мелкосерийном, серийном и массовом производствах по-прежнему лидирующими технологиями являются штамповка и литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). Штамповкой можно получить большое число изделий высокого качества с минимальной последующей обработкой, но имеются ограничения по геометрической сложности изделий. Способ ЛВМ дает больше возможностей дизайнерам и менее дорог при мелкосерийном производстве. В Италии, например, широко используют литье совместно с галтовкой, что позволяет снизить трудоемкость при механической обработке изделий. Однако применение галтовки портит рельеф (геометрию) изделий и делает невозможным изготовление высококачественных изделий, хотя понятия качества у производителей разные. Большинство людей оценивают ювелирные изделия только по внешнему виду, а если для осмотра использовать лупу, хотя осмотр изделий под лупой противоречит действующему ОСТ, то можно увидеть поры на поверхности, неровности в простановке камней. Все это связано со снижением себестоимости изделий. Но как известно, хорошее требует больших затрат. Например, брендовые итальянские изделия делают с высоким качеством, небольшими сериями и оригинальным дизайном. Большинство таких изделий изготовляют ЛВМ и последующей ручной обработкой, а закрепку камней проводят под микроскопом, что обеспечивает высочайшее качество изделий.

О состоянии дел на Российском ювелирном рынке. Для получения заготовок колец, серег, подвесок и других украшений в основном используют технологию ЛВМ, которая позволяет изготовлять изделия цельнолитыми, сложной конфигурации, за небольшой срок, что очень важно сегодня, так как основным преимуществом продаж ювелирных изделий является дизайн, который должен постоянно обновляться. Также ЛВМ возможно изготовлять небольшие партии изделий (от 10 до 100 шт) при невысоких затратах по сравнению с другими способами изготовления изделий, например штамповкой.

Технологический процесс производства ювелирных изделий можно разбить на 8 этапов:

1. Прорисовка эскиза.
2. Изготовление Мастер-Модели (ММ).
3. Изготовление эластичной пресс-формы.
4. Изготовление выплавляемых моделей и модельных блоков.
5. Изготовление литейной формы и ее прокаливание.
6. Заливка формы.
7. Выбивка блока отливок из формы и отделение отливок от стояка.
8. Механическая обработка отливок.

Первые два этапа взаимосвязаны между собой, т.е. идет совместная работа дизайнера с модельером, так как нужно учесть многие особенности, которые влияют на дальнейшие операции производства (например, толщины стенок модели, диаметры кастов, крапанов и т.п.), связанных с усадочными процессами и механической обработкой изделий. После создания эскиза переходят ко второму этапу.

На сегодняшний день существует множество методов изготовления ММ, начиная от ручных методов (обработка напильниками, штихелями и др.) до более производительных (применение станков с ЧПУ, послойное выращивание типа SLA, Objet, Solidscape, Envisiontec и др.), которые в любом случае требуют доработки модели вручную. В данной статье не рассмотрены методы и принципы изготовления ММ, поэтому подробно останавливаться на этом этапе не будем и рассмотрим более подробно основные этапы технологии ЛВМ.

Изготовление эластичной пресс-формы. Эластичная пресс-форма необходима для тиражирования ММ. Существует ряд способов (по "горячей" и "холодной" резине) для ее изготовления. Рассмотрим самый распространенный способ, который

наиболее эффективен при изготовлении малых и крупных серий выплавляемых моделей.

Рамки для изготовления пресс-формы изготовляют из сплавов алюминия, так как они имеют хорошую теплопроводность, следовательно, прогрев формы при вулканизации будет наиболее равномерный, чем при использовании других материалов. Имеет место также хорошее отделение пресс-формы от рамки.

Прежде чем формовать ММ, необходимо выбрать линию разъема так, чтобы можно было извлечь выплавляемую модель без разрушения или деформации. Затем необходимо оценить, сколько листов резины требуется, чтобы сформировать пресс-форму. Разделив это число на два, получим число листов резины, укладываемых в нижнюю половину рамки пресс-формы. Все защитные пленки с резины должны быть удалены, а листы размещены один поверх другого на половину глубины пресс-формы. Затем конический формирователь литника устанавливают на питатель, далее металлическую ММ устанавливают в рамку пресс-формы на резину так, чтобы формовочный элемент был доступен с одного конца пресс-формы. Сверху на ММ укладывают листы резины до верхней кромки рамки. Теперь необходимо устранить щели между резиной и рамкой путем надавливания на верхний слой резины или добавить кусочки резины в щели (рис. 1, см. цвет. вкладку). Форма готова к полимеризации.

Полимеризация проводится при температуре 165...177 °С в течение 15 мин на каждый лист резины (для силиконовой резины castaldo) и давлении 2,8...3,0 МПа. Для этого форму ставят под термопресс (рис. 2, см. цвет. вкладку) на 45...60 мин в зависимости от числа листов резины. Далее форму удаляют из пресса, охлаждают до 40...50 °С под струей холодной воды или на воздухе и извлекают из рамки. Немного нагретая форма более эластична, следовательно, ее проще изгибать при разрезании.

Форму разрезают скальпелем, начиная от литника и затем зигзагообразными движениями по периметру (полученные элементы будут служить центрирующими элементами). Затем пресс-форму устанавливают коническим литником вверх и продолжают разрезание поперек литника. Разрез делают все глубже и глубже, пока не будет достигнута модель. Процесс заключается в растягивании резины пальцами и выполнении длинных разрезов кончиком лезвия от литника до края пресс-формы. В результате будут получены параллельные разрезы. По мере того как проводится разрезание, достигаются края модели; разрезание должно выполняться тщательно, чтобы исключить повреждение ММ и затупление лезвия. Цель заключается в том, чтобы сделать разрез либо по грани, либо в средней точке толщины модели. Далее необходимо вести рез по периметру до тех пор, пока форма не будет разделена на две части. После того как резиновую форму разрезали, ММ извлекают. Потом в пресс-форме делают надрезы, чтобы выплавляемая модель удалялась без деформации. Разрезанная форма показана на рис. 3 (см. цвет. вкладку).

Изготовление выплавляемых моделей и модельных блоков. Модели можно изготовлять несколькими способами, такими как запрессовка с помощью ручного, полуавтоматического или автоматического инжектора. На крупных заводах в основном используют автоматические инжекторы (рис. 4, см. цвет. вкладку), так как их производительность больше ручных и полуавтоматических в 2–7 раз. Например, на автоматическом инжекторе изготовляют до 700...800 выплавляемых моделей за смену, а на ручном – не более 200...300. К тому же автоматический ижектор обеспечивает более высокое качество и стабильность размеров изделий.

Принцип работы автоматического инжектора следующий: сначала растапливают воск до нужной температуры (зависит от вида воска и конфигурации изделия), затем пресс-форму собирают, устанавливают в зажимное устройство и выбирают оптимальную глубину и время наложения вакуума, давление, время запрессовки и подпрессовки модельного состава, температуру сопла инжектора, а также оптимальное время и силу сжатия пресс-формы. После этого при нажатии кнопки "Пуск" установка начинает работу в следующем порядке:

захват резиновой пресс-формы; подвод пресс-формы к соплу инжектора; вакуумирование пресс-формы; заполнение пресс-формы модельным составом; подпрессовка модельного состава; возврат пресс-формы в исходное положение; снятие силы сжатия пресс-формы.

По окончании работы автоматического ижектора пресс-форму охлаждают на воздухе, раскрывают и извлекают выплавляемую модель. Далее процесс повторяется. Для повышения производительности обычно стараются подобрать несколько резиновых пресс-форм с близкими или одинаковыми режимами изготовления восковых моделей.

Сборку модельных блоков осуществляют с помощью паяльника для воска и специального приспособления, которое облегчает сборку модельного блока. Модели припаивают к центральному стояку под углом 10...45° в зависимости от вида заливки и модели. Блок моделей собирают сверху вниз, чтобы избежать случайных капель воска и повреждения модели жалом паяльника.

Изделия на модельном блоке должны быть одинаковыми или близкими по толщинам и конфигурации, чтобы температура заливки и литейной формы была оптимальной для изготовления всех изделий. Если блок состоит из различных деталей, то тонкие и витиеватые изделия стараются разместить на верху модельного блока, так как там будет самое высокое давление, а снизу – более массивные изделия. Все это позволяет избежать таких дефектов, как газовая и усадочная пористость. Собранный модельный блок приведен на рис. 5 (см. цвет. вкладку). Далее блок взвешивают на электронных весах, чтобы вычислить массу необходимого металла $M_{мет}$ по следующей формуле:

$$M_{мет} = \frac{M_{в}\rho_{мет}}{\rho_{в}},$$

где $M_{в}$ – масса взвешиваемого воска, г; $\rho_{мет}$, $\rho_{в}$ – плотность металла и воска соответственно, г/см^3.

Изготовление литейной формы. В ювелирном производстве форму изготовляют из гипсодинасовых смесей, где гипс является связующим для огнеупорного материала. Цикл формовки занимает не более 12 мин. Процесс заключается в следующем: на колошу с блоком моделей надевают перфорированную опоку (рис. 6, см. цвет. вкладку), обмотанную широким скотчем, чтобы жидкая формомасса не вытекала из отверстий. Опоку с блоком моделей помещают в камеру формовочной машины (рис. 7, 8, см. цвет. вкладку) для формовки. Затем в миксер наливают необходимое количество воды, засыпают необходимое количество сухой формомассы (в формовочной смеси R&R ultra-vest это соотношение составляет 38 частей (воды) /100 частей (формомассы)). Камеру миксера закрывают крышкой и начинают перемешивать смесь, при этом одновременно включают вибрацию и вакуум для удаления пузырьков воздуха из формовочной смеси. Тщательно перемешанную смесь заливают в форму, которая расположена под миксером. Заливку проводят в вакууме для того, чтобы воздух не попадал в смесь. Затем форму подвергают вибрации. Удаление воздуха позволяет избежать возникновения пузырьков воздуха на поверхности выплавляемой модели, которые впоследствии станут капельками металла на отливке. Далее форму выдерживают на воздухе 1,5...2 ч, чтобы она приобрела определенную прочность.

Выплавление модельного состава и прокаливание формы. Выплавлять воск можно двумя способами: в паровом шкафу или в прокалочной печи (рис. 9, см. цвет. вкладку) при установке в ней решетки, на которой будут помещаться опоки. Воск стекает в специальный бак, установленный в печи. Вытапливание воска

из формы происходит при невысоких температурах (около 100 °С), что обеспечивает неразрушение формы в процессе прокаливания. Большое количество воска (до 70 %) не вытекает, а сгорает при прокаливании формы. Соблюдение режима первого цикла прокаливания очень важно, так как при быстром нагреве возможно разрушение литейной формы под воздействием водяного пара, а также из-за расширения воска. Это может привести к таким дефектам, как залив (облой) или неметаллические включения в отливках (при осыпании разрушенных частей формы в полости, куда будет подаваться расплавленный металл). Температурный режим прокаливания зависит от вида формовочной смеси и размера опоки. Температуру формы под заливку выбирают в зависимости от вида изделий и сплава. Касты, накладки, тонкостенные сережки заливают обычно при температурах формы 580...650 °С, а массивные кольца, мужские печатки – при 450...550 °С.

Самый важный этап в изготовлении отливок – заливка металла. Для получения максимального качества заготовок необходимо определить температуру сплава и формы. К сожалению, в большинстве случаев литейщики-ювелиры выбирают режимы литья из собственного опыта, а не используют специальные методики расчета. Немаловажное значение имеет и тип литейной установки. В настоящее время в основном используют два способа заливки: центробежную и заливку донного разлива. В центробежных машинах заполнение ведется под действием центробежных сил; во втором способе – под давлением сверху и вакуумом снизу (рис. 10, см. цвет. вкладку). Второй способ получил наибольшее распространение из-за компактности машин и высокого качества отливок. Рассмотрим второй способ заполнения формы.

Перед первой плавкой тигель прокаливают для того, чтобы удалить влагу и снизить время плавления металла в тигле. Затем в горячий тигель засыпают гранулы металла. Если заливают несколько форм с различными сплавами, последовательность засыпки гранул должна быть следующей: сначала заливают сплав 750-й пробы, затем 585-й. В противном случае может быть занижена 750-я проба. Если сплавы имеют разный цвет, но одинаковую пробу, то в первую очередь плавят белый сплав, а затем красный. Это обусловлено качеством литья, т.е. исключением дефектов в отливках, таких как газовая пористость.

Белый сплав с содержанием никеля очень "капризен" в литье и имеет более высокую температуру плавления, а следовательно, износ тигля возрастает и приводит к его обрушению, поэтому рекомендуют использовать новые тигли из высококачественного графита, затем отработанные тигли на белом золоте используют для красного золота. Красный сплав имеет хорошую жидкотекучесть и низкую температуру плавления и заливки по сравнению с белым, поэтому при низком качестве тигля можно все равно получить качественное литье.

Плавка металла. Одним из самых распространенных методов плавки металла является индукционная плавка. Ее ведут в среде инертного газа или в вакууме. В среде инертного газа металл плавится дольше, чем в вакууме, но при этом угар и выгорание легкоплавких компонентов значительно меньше. Угар металла в среде инертного газа составляет менее 0,1 % от массы загружаемой шихты. Индуктор обеспечивает перемешивание металла в тигле без помощи механических приспособлений (например, кварцевого стерженька), а следовательно, исключено попадание кислорода в расплав.

Продолжительность плавки зависит от мощности индуктора, типа сплава, массы сплава и размера гранул. Обычно длительность плавки составляет 2...4 мин. После того как температура металла приближается к температуре заливки, из прокалочной печи достают опоку и устанавливают ее в вакуумную камеру литейной машины. Затем камеру с опокой поворачивают под дно тигля и вакуумируют форму. Обычно достаточно 30...45 с в зависимости от мощности насоса.

Далее поднимается стопор и происходит заливка. Примерное время заливки составляет 2...7 с в зависимости от массы заливаемого металла. После того как температура металла опустится ниже линии солидуса, форму извлекают из литейной машины и ставят на керамическую подставку. Для ювелирных изделий выдержка до выбивки формы составляет 10...30 мин. Это обусловлено тем, что при быстром охлаждении металлического блока металл будет обладать большей жесткостью и, следовательно, возникнут сложности в закрепке.

Выбивку отливок из литейной формы ведут в воде. Форму сначала помещают в бак с водой и поступательными движениями вымывают гипсодинасовую смесь, а затем в промывочную камеру (рис. 11, см. цвет. вкладку) и удаляют остатки смеси, прилипшие к блоку отливок. Далее блоки помещают в емкость с отбеливающим раствором. Для лучшего удаления оксидной пленки и пригара эту емкость помещают в ультразвуковую ванну, блоки извлекают и сушат в сушильном шкафу.

Отделение отливок от стояка осуществляют с помощью кусачек или гидравлических ножниц. Его необходимо проводить аккуратно, чтобы не деформировать и не повредить детали.

Механическая обработка. Сначала детали монтируют, т.е. припаивают накладки (если имеются), затем снимают поверхностный слой и подготавливают поверхности к шлифовке. Шлифовку осуществляют с помощью щеток, кругов и абразивных паст на шлифовальном станке. Поверхность изделий становится блестящей. Обычно после шлифовки ставят именники и пробы – клейма, указывающие производителя и соответствие сплава заявленной пробе. Затем проводится закрепка вставок (камней) корневертками, штихелями, давчиками и т.п. Далее следует операция полировки. Ее осуществляют фетровыми кругами и полировальными пастами на полировальном станке. Затем изделия моют в ультразвуковых ваннах и отправляют в магазин. При этом на каждом этапе производят контроль качества изделий в соответствии с ОСТ 117-3-002–95 от 2003 г.

В данной статье рассмотрен технологический процесс изготовления ювелирных изделий, производимых на Российских заводах. Заводы, изготовляющие таким образом свою продукцию, выпускают сложные и интересные изделия. Если изделия простые, не имеющие сложный дизайн и выпускающиеся в массовом производстве, не имеет смысла использовать данную технологию. Лучше использовать альтернативные методы изготовления изделий: например, штамповку, применение которой исключит большое количество технологических операций и существенно снизит стоимость изделий.

Сергей Яковлевич Иванов, технолог;
Валерий Аверьянович Рыбкин, д-р техн. наук

Сплавы магниевые литейные по ГОСТ 2856–79*

1. ГОСТ 2856–79 распространяется на магниевые литейные сплавы, предназначенные для изготовления фасонных отливок.

2. В зависимости от химического состава устанавливаются следующие марки сплавов: МЛ3, МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6, МЛ8, МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ12, МЛ15 и МЛ19.

Буквы "пч" и "он" означают: пч – повышенной частоты, он – общего назначения.

3. Магниевые сплавы должны изготовляться в соответствии с требованиями ГОСТ 2856–79 с химическим составом, указанным в табл. 1.

4. Механические свойства сплавов, определяемые на отдельно отлитых образцах, должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 2.

5. Определение химического состава проводят по ГОСТ 3240.0–76 – ГОСТ 3240.21–76 или по ГОСТ 7728–79 или другими методами, обеспечивающими сопоставление результатов.

При разногласиях в оценке результатов по определению химического состава определения проводят по ГОСТ 3240.0–76 – ГОСТ 3240.21–76.

Массовую долю иттрия в сплаве марки МЛ19 определяют в соответствии с нормативно-технической документацией.

1. Химический состав (% мас., остальное Mg) магниевых литейных сплавов

Марка сплава	Основные компоненты				
	Al	Mn	Zn	Zr	Прочие
МЛ3	2,5...3,5	0,15...0,5	0,5...1,5	–	–
МЛ4	5,0...7,0	0,15...0,5	2,0...3,5	–	–
МЛ4пч	5,0...7,0	0,15...0,5	2,0...3,5	–	–
МЛ5	7,5...9,0	0,15...0,5	0,2...0,8	–	–
МЛ5пч	7,5...9,0	0,15...0,5	0,2...0,8	–	–
МЛ5он	7,5...9,0	0,15...0,5	0,2...0,8	–	–
МЛ6	9,0...10,2	0,1...0,5	0,6...1,2	–	–
МЛ8	–	–	5,5...6,6	0,7...1,1	0,2...0,8 Cd
МЛ9	–	–	–	0,4...1,0	0,2...0,8 In; 1,9...2,6 Nd
МЛ10	–	–	0,1...0,7	0,4...1,0	2,2...2,8 Nd
МЛ11	–	–	0,2...0,7	0,4...1,0	2,5...4,0 сумма РЗМ
МЛ12	–	–	4,0...5,0	0,6...1,1	–
МЛ15	–	–	4,0...5,0	0,7...1,1	0,6...1,2 La
МЛ19	–	–	0,1...0,6	0,4...1,0	1,6...2,3 Nd; 1,4...2,2 Y

Марка сплава	Примеси, не более									
	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Zn	Be	Zr	Прочие	Сумма определяемых примесей
МЛ3	–	0,25	0,06	0,01	0,1	–	0,002	0,002	0,1	0,5
МЛ4	–	0,25	0,06	0,01	0,1	–	0,002	0,002	0,1	0,5
МЛ4пч	–	0,08	0,007	0,002	0,04	–	0,002	0,002	–	0,13
МЛ5	–	0,25	0,06	0,01	0,1	–	0,002	0,002	0,1	0,5
МЛ5пч	–	0,08	0,007	0,001	0,04	–	0,002	0,002	–	0,13

* ГОСТ 2856–79 в редакции 1988 г.

Марка сплава	Примеси, не более									
	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Zn	Be	Zr	Прочие	Сумма определяемых примесей
МЛ5он	–	0,35	0,08	0,01	0,25	–	0,002	0,002	0,1	0,7
МЛ6	–	0,25	0,06	0,01	0,1	–	0,002	0,002	0,1	0,5
МЛ8	0,02	0,03	0,01	0,005	0,03	–	0,001	–	0,12	0,2
МЛ9	0,02	0,03	0,01	0,005	0,03	0,15	0,001	–	0,10	0,35
МЛ10	0,02	0,03	0,01	0,005	0,03	–	0,001	–	0,12	0,2
МЛ11	0,02	0,03	0,02	0,005	0,03	–	0,001	–	0,12	0,2
МЛ12	0,02	0,03	0,01	0,005	0,03	–	0,001	–	0,12	0,2
МЛ15	0,02	0,03	0,01	0,005	0,03	–	–	–	0,12	0,2
МЛ19	0,03	0,03	0,01	0,005	0,03	–	0,001	–	0,14	0,25

Примечания: 1. РЗМ – элементы, входящие в состав цериевого миш-металла, содержащего не менее 45 % Ce.

2. При одновременном содержании бериллия и циркония в сплавах марок МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч массовая доля бериллия не должна превышать 0,0015 %.

3. В сплаве МЛ5пч массовая доля титана допускается не более 0,005 %.

2. Механические свойства магниевых литейных сплавов

Марка сплава	Способ литья	Вид термической обработки	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при $l = 5d$, %
			не менее		
МЛ3	З	–	160	–	6
МЛ4	З, О, К	–	160	80	3
	З, О, К	Т4	220	80	5
	З, О, К	Т6	225	100	2
МЛ4пч	З, О, К	–	160	80	3
	З, О, К	Т4	220	80	5
	З, О, К	Т6	225	100	2
МЛ5	З, О, К	–	160	90	2
	З, О, К	Т2	160	85	2
	З, О, К	Т4	235	90	5
	З, О, К	Т6	235	110	2
	Д	–	175	110	1
МЛ5пч	З, О, В, Г, К	–	160	90	2
	З, О, В, Г, К	Т2	160	85	2
	З, О, В, Г, К	Т4	235	90	5
	З, О, В, Г, К	Т6	235	110	2
	Д	–	175	110	1
МЛ5он	З, О, К	–	160	90	2
	З, О, К	Т4	230	85	5
	З, О, К	Т6	230	105	2
МЛ6	З, К	–	150	–	1
	З, К	Т4	225	110	4
	З, К	Т6	225	140	1
	З, К	Т61	230	140	1
МЛ8	З, О, К, В, Г	Т6	265	170	4

Марка сплава	Способ литья	Вид термической обработки	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при $l = 5d$, %
			не менее		
МЛ8	З, О, К, В, Г	Т61	275	175	4
МЛ9	З, О, К, В, Г	Т6	230	110	4
МЛ10	З, О, К, В, Г	Т6	230	140	3
	З, О, К, В, Г	Т61	240	140	3
МЛ11	З, О, К, В, Г	–	120	70	1,5
	З, О, К, В, Г	Т2	120	70	1,5
	З, О, К, В, Г	Т4	140	85	3,0
	З, О, К, В, Г	Т6	140	100	2,0
МЛ12	З, О, К, В, Г	–	200	90	6
	З, О, К, В, Г	Т1	230	130	5
МЛ15	З, О, К, В, Г	Т1	210	130	3
МЛ19	З, К	Т6	220	120	3

Примечания: 1. Обозначения способов литья:

З – литье в песчаные формы; К – литье в кокиль; О – литье в оболочковые формы; В – литье по выплавляемым моделям; Г – литье в гипсовые формы; Д – литье под давлением.

2. Обозначения видов термической обработки:

Т1 – старение; Т2 – отжиг; Т4 – гомогенизация и закалка на воздухе; Т6 – гомогенизация, закалка на воздухе и старение; Т61 – гомогенизация, закалка в воду и старение.

3. Для сплава МЛ10 с массовой долей цинка не более 0,5 % термическая обработка по режиму Т61.

4. Предел текучести определяется по согласованию изготовителя с потребителем.

6. Механические свойства сплавов определяют по ГОСТ 1497–84.

Форма и размеры отдельно отлитых образцов при литье в песчаные формы, кокиль и оболочковые формы, по выплавляемым моделям и в гипсовые формы должны соответствовать указанным на рис. 1, а при литье под давлением – на рис. 2.

Допускается уменьшать длину головки образца в зависимости от конструкции захватов испытательной машины.

Образцы для всех видов литья, кроме литья под давлением, отливают в песчаные формы. Допускается отливка образцов в кокиль.

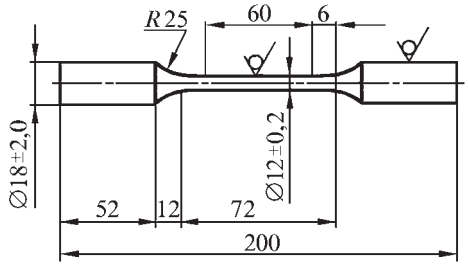


Рис. 1. Форма и размеры отдельно отлитых образцов при литье в песчаные формы, кокиль и оболочковые формы, по выплавляемым моделям и в гипсовые формы

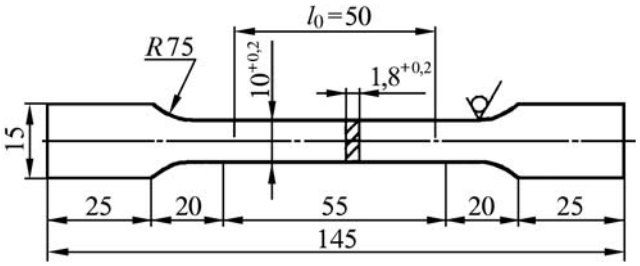


Рис. 2. Форма и размеры отдельно отлитых образцов при литье под давлением

При литье под давлением допускается вырезка образцов из прилитых пластин толщиной $1,8^{+0,2}$ мм, при этом параметр шероховатости обрабатываемой поверхности по ГОСТ 2789–73 должен быть не менее 20 мкм.

Отдельно отлитые образцы испытывают с литейной коркой. Заусенцы на плоскости разъема формы и места отрезки от литниковой системы должны быть удалены зачисткой.

Термическая обработка образцов для испытаний механических свойств сплавов должна соответствовать термической обработке, установленной для отливок из этих сплавов.

А.Е. Балановский *(ЗАО "НПФ Плазмопротек", г. Иркутск)*

Плазменные технологии в промышленности: состояние и перспективы

Приведен обзор применяемых в настоящее время в промышленности плазменных технологий сварки, пайки и резки. Проведено сравнение различных способов и технологий. Даны рекомендации по выбору оптимального оборудования для различных технологических процессов.

The article views different plasma technologies of welding, brazing and cutting. The comparison of different methods is brought. The recommendations on choice of the optimal equipment for the different technological processes are done.

Развитие плазменных технологий (сварка, резка, наплавка и др.) в промышленности получило новый импульс в конце XX в. с созданием новых источников питания, плазмотронов. По плотности энергии плазменная дуга (струя) занимает промежуточное место между электродуговыми и лучевыми источниками тепла. В сравнении с дуговыми источниками плазменный позволяет получить более высокую температуру и плотность теплового потока на обрабатываемом изделии; в то же время он экономичнее и доступнее по техническому воплощению в сравнении с лучевыми источниками.

Плазменные технологии характеризуются более широкими возможностями регулирования параметров процесса обработки изделия по сравнению с дуговыми. В каждом технологическом процессе доминируют определенные параметры формирования плазменной дуги [1, 2].

Для плазменной резки характерно интенсивное сжатие газовым потоком столба дуги, что предопределяет высокие плотность ее теплового потока и газодинамический напор, благодаря которым достигаются режущие свойства плазмы. Для микроплазменной сварки характерно сжатие прианодного участка столба дуги теплопроводным водородосодержащим вторичным потоком газа, что обеспечивает "ювелирную" сварку металлов малых толщин так называемой иглоподобной плазмой.

Для плазменной наплавки в отличие от электродуговой появляется возможность ввода в прианодную часть столба плазменной дуги наплавочного металла (проволоки или порошка) и, таким образом, разделенного регулирования тепловложения в присадочный и основной металлы. В свою очередь это обусловливает малую долю проплавления основного металла и возможность получения в наплавленном металле требуемого химического состава.

При плазменном напылении ввод порошка или проволоки в высокоскоростную (сверхзвуковую) плазменную струю приводит к интенсивному нагреву мелких частиц до пластического состояния, разгону их до высоких скоростей, что обеспечивает высокие адгезионные свойства покрытия из самых тугоплавких материалов.

При плазменном поверхностном упрочнении металлов, благодаря высокой концентрации теплового потока на поверхности металла, происходит мгновенный разогрев поверхностного слоя до температуры структурных превращений с последующим охлаждением путем теплопроводности в основной металл.

При плазменно-дуговом переплаве появляется уникальная возможность рафинирования переплавляемого металла путем его взаимодействия с мощными протяженными плазменными дугами при практически любом химическом составе плазмообразующего газа в широком диапазоне высоких температур.

Все перечисленные выше направления в плазменных технологиях нашли эффективное промышленное применение и интенсивно развиваются в последние годы. Рассмотрим некоторые из них более подробно [2] с учетом тепло- и электрофизических особенностей процесса, который практически имеет одинаковую природу для всех плазменных технологий.

Тепловые, электрические и физические основы плазменных технологий

Плазменные технологии характеризуются сложными явлениями преобразования электрической энергии источника тока в тепловую энергию плазменной дуги, интенсивным сжатием ее столба в формирующейся камере плазмотрона и тепловым воздействием на обрабатываемый материал.

Для генерирования плазменного источника нагрева во всех технологиях используют плазмотроны прямого и косвенного действия [2–8]. Важнейшую роль в формировании плазменного потока играет дуговая камера плазмотрона, которая в зависимости от способа имеет различные геометрические размеры. Основные параметры дуговой камеры на примере плазмотрона для воздушно-плазменной резки представлены на рис. 1. Исходным размерным параметром камеры плазмотрона является диаметр сопла d_c, который выбирают из оптимальной плотности тока в канале со-

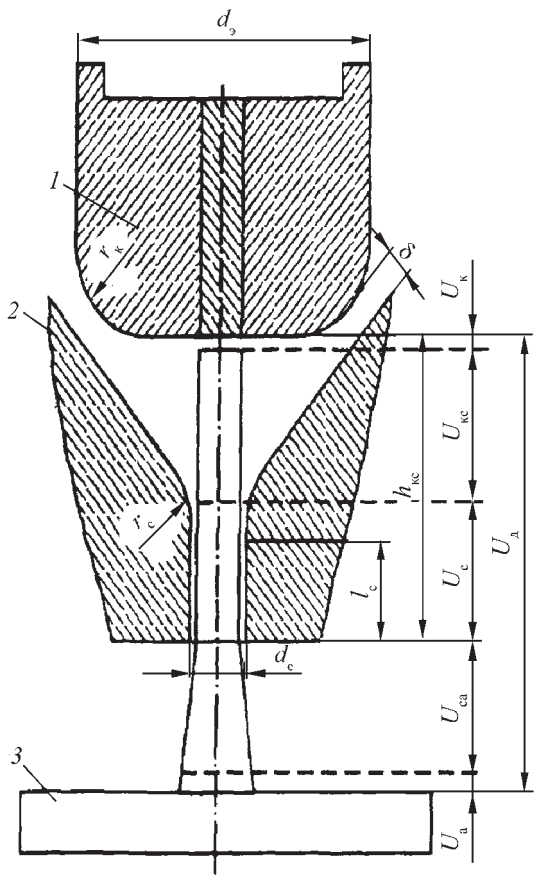


Рис. 1. Геометрические параметры дуговой камеры плазмотрона для воздушно-плазменной резки:
1 – катод; *2* – сопло; *3* – анод

пла $j_с = 4I_д / pd_с^2$, где $I_д$ – ток дуги; p – давление газа в канале сопла.

Для плазмотронов с воздушным охлаждением оптимальная плотность тока $j = 4045$ А/мм^2 для тока дуги $I_д \le 150$ А, для плазмотронов с водяным охлаждением $j = 4580$ А/мм^2 при $I_д = 300...1000$ А.

Распределение напряжений на характерных участках столба дуги может быть выражено в виде суммы падений напряжений [3]:

для плазмотронов прямого действия (см. рис. 1):

$$U_д = U_к + U_{кс} + U_с + U_{са} + U_а; \quad (1)$$

для плазмотронов косвенного действия

$$U_д = U_к + U_{кс} + U_с, \quad (2)$$

где $U_с$ – падение напряжения на сопле-аноде.

Баланс энергии определяют с помощью выражений:

$$U_{кс} = E_{кс} l_{кс}; \quad (3)$$

$$U_с = E_с l_с; \quad (4)$$

$$U_{са} = E_{са} l_{са}, \quad (5)$$

где $l_{кс}$, $l_с$ и $l_{са}$ – протяженности соответственно досоплового, внутрисоплового и засоплового участков плазменной дуги; E – напряженность электрического поля дуги на этих участках.

По данным Э.М. Эсибяна, $E_{кс}$ и $E_с$ практически одинаковы по величине и неизменны по длине. Поэтому для плазмотронов прямого действия

$$E_{кс} >> E_с = (U_д - U_к + U_а)/(l_д - l_с), \quad (6)$$

а для плазмотронов косвенного действия

$$E_{кс} \approx E_с = (U_д - U_к)/U_{кс}. \quad (7)$$

Тепловую мощность, передаваемую плазменной дугой обрабатываемому изделию, определяют из общего баланса энергии:

$$q = q_к + q_с + q_{ос} + q_а, \quad (8)$$

где q – полная электрическая мощность, подводимая к плазмотрону; $q_к$ – мощность, расходуемая на нагрев катода; $q_с$ – мощность, расходуемая на нагрев сопла; $q_{ос}$ – мощность, расходуемая на нагрев окружающей среды; $q_а$ – мощность, расходуемая на нагрев изделия.

Электрическая энергия, трансформируемая в тепловую на катоде, включает кинетическую энергию ионов, падающих на катод $(1 - f)U_к I$ (где f – доля электронного тока), и энергию их нейтрализации $(1 - f)(U_i - w)$, где U_i – потенциал ионизации атомов газа; w – работа выхода электронов для материала катода [7].

Таким образом, на нагрев и теплоотдачу в окружающую среду затрачивается мощность:

$$q_к = (1 - f)(U_к + U_i)I - wI; \quad (9)$$

$$q_а = (U_а + w + (5/2e)RT)I; \quad (10)$$

$$q_{ос} \approx (0{,}1 \ldots 0{,}25) I E_{са} l_{са}, \quad (11)$$

где T – температура газа на внешней границе прикатодной области; R – постоянная Больцмана; e – заряд электрона.

Мощность, расходуемая на нагрев изделия плазмотроном прямого действия:

$$q = q_а + (0{,}75 \ldots 0{,}9) I E_с (l_с + l_{кс}) + E_{са} l_{са}; \quad (12)$$

косвенного действия:

$$q = q_а + (0{,}1 \ldots 0{,}25) I E_с (l_с + l_{кс}). \quad (13)$$

Внутренний КПД плазмотронов можно определить, используя баланс энергии плазмотрона:

$$q = q_г + q_к + q_с, \quad (14)$$

где q – энергия, расходуемая на нагрев плазмообразующего газа.

В стационарном режиме работы вся мощность, идущая на нагрев сопла и катода, отводится охлаж-

дающей жидкостью. Эти потери рассчитывают по выражению

$$q_к + q_с = cG_в(T_в - T_о), \qquad (15)$$

где c – теплоемкость воды; $G_в$ – расход воды; $T_в$ – температура воды в установившемся режиме работы; $T_о$ – начальная температура воды.

Тогда внутренний КПД плазмотрона равен

$$\eta_{вн} = (q_г / q) = (q - q_с - q_к)/q. \qquad (16)$$

Для увеличения внутреннего КПД плазмотрона рекомендуется увеличить расход плазмообразующего газа и уменьшить размеры дуговой камеры. Известно, что внутренний КПД плазмотрона возрастает с ростом теплопроводности газов. Интенсивный теплообмен электрической дуги с определенными элементами плазмотрона является определяющим фактором на такие параметры плазменной струи (дуги), как эффективная тепловая мощность, температура, среднемассовая температура, теплосодержание, скорость и давление. Сильное влияние на мощность, расходуемую на нагрев катода и сопла плазмотрона, оказывают ток и длина дуги в дуговой камере, а также расход плазмообразующего газа.

Экспериментальная оценка тепловой эффективности плазменных процессов проведена многими авторами по результатам калориметрирования [4, 6–10]. По оценке К.В. Васильева, при плазменной резке термический КПД процесса составляет 80...85 %, по оценке Ю.С. Борисова, термический КПД процесса плазменного напыления составляет 0,7...0,8 %. Результаты калориметрирования, проведенного Э.М. Эсибяном для воздушно-плазменной резки, представлены на рис. 2, *а*, где видно, что 76...81 % энергии идет на нагрев изделия. С увеличением силы тока мощность, затрачиваемая на нагрев изделия, возрастает (рис. 2, *б*).

Таким образом, тепловые процессы в плазменных технологиях характеризуются высокой эффективностью, что обусловлено плазменным потоком сжатой электрической дуги. Это является основным отличием от обычных электродуговых процессов, в которых основная доля выделяемого в обрабатываемом изделии тепла приходится на катодную и анодные области дуги.

В последнее время на рынке сварочной техники появились плазмотроны с пароводяной плазмой, которые пока плохо освещены в специальной литературе. Рассмотрим основные принципы работы таких плазмотронов.

Все существующие электродуговые генераторы пароводяной плазмы в зависимости от способа пространственной стабилизации столба дуги подразделяются на пять типов [6]. В плазмотронах с водяной стабилизацией электрическая дуга горит внутри водяной трубки, диаметр которой соизмерим с диаметром столба дуги. Охлаждая периферию дугового разряда, трубка не дает ему отклониться в радиальном направлении и удерживает строго на оси, стабилизируя тем самым положение разряда в пространстве. При этом часть воды испаряется с внутренней поверхности трубки, превращаясь в пароводяную плазму.

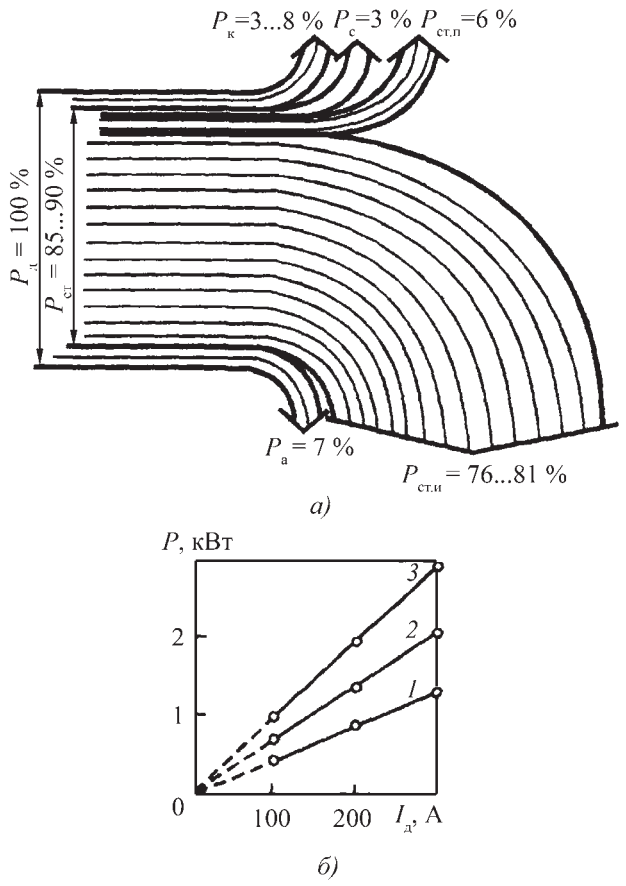


Рис. 2. Энерготепловой баланс воздушно-плазменной дуги (*а*) и зависимость потерь тепловой мощности в сопле $P_с$ (*1*), в катоде $P_к$ (*2*) и мощности, выделяемой электронным током в аноде $P_а$ (*3*) от тока дуги $I_д$ (*б*)

Водяную трубку создают либо путем тангенциального ввода воды в цилиндрическую дуговую камеру (рис. 3, *а*), либо за счет механического вращения корпуса камеры (рис. 3, *б*), в которую извне подают определенное количество воды. Эта вода вовлекается во вращение и под действием центробежных сил образует на боковых стенках водяной слой заданной толщины, который одновременно защищает стенки камеры от нагрева и является источником рабочего вещества – водяного пара.

Избыток воды сливается через открытые торцы. Если диаметр водяной трубки значительно превышает диаметр столба дуги, то одной водяной стабилизации оказывается недостаточно. Здесь необходимо дополнительное магнитное поле, радиальная составляющая которого заставляет столб дуги перемещаться в поперечном направлении, непрерывно прижимая его к внутренней поверхности водяной трубки [6].

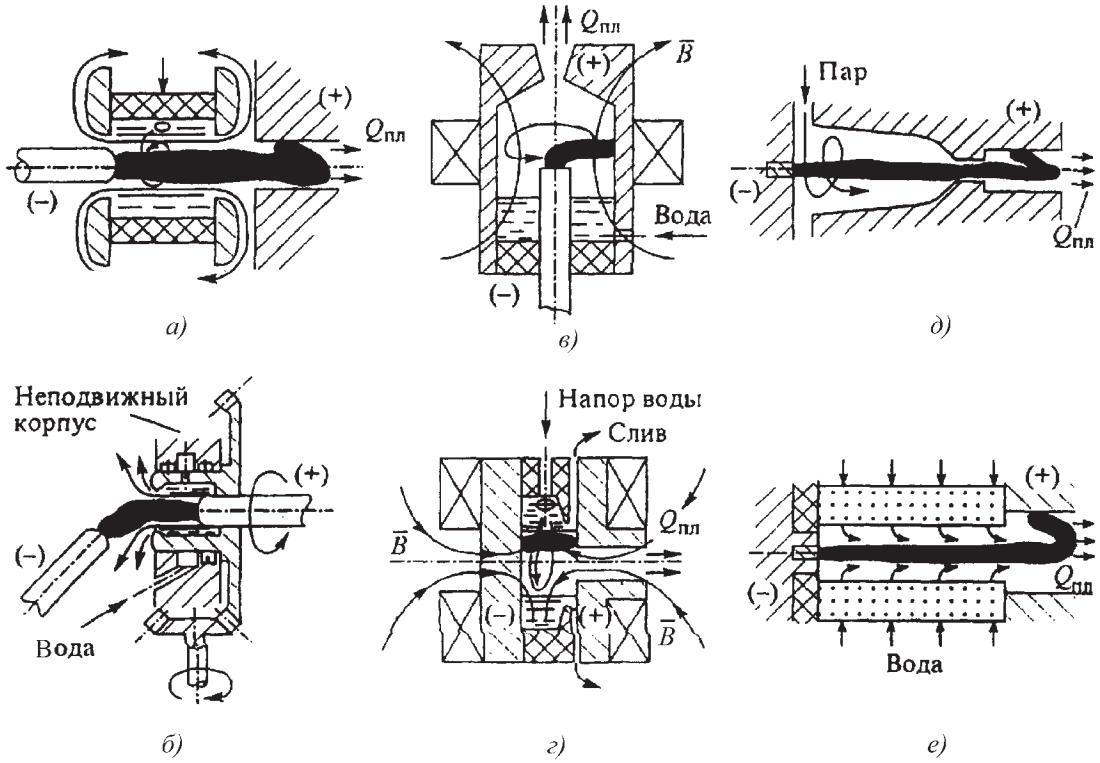


Рис. 3. Классификация электродуговых генераторов пароводяной плазмы по способу стабилизации дуги:
а, *б* – с водяной стабилизацией; *в* – с магнитной стабилизацией; *г* – с магнитно-водяной стабилизацией; *д* – с паровихревой стабилизацией; *е* – с пористым вдувом

В плазмотронах с магнитной стабилизацией электрическая дуга вращается под действием внешнего магнитного поля, создаваемого специальным соленоидом. Это магнитное поле заставляет дугу двигаться по заданной траектории (рис. 3, *в*), стабилизируя ее в пространстве. Нижняя часть камеры заполнена водой, с зеркальной поверхности которой происходит испарение за счет теплового действия дуги. Пар, проходя сквозь вращающийся дуговой разряд, превращается в пароводяную плазму и истекает через сопло наружу.

Рассмотренные выше плазмотроны используют в качестве исходного вещества воду. В объеме их дуговых камер происходит паро- и плазмогенерация. Такое совмещение различных агрегатных состояний одного вещества при наличии их взаимопревращений сопровождается взрывоиспарительными процессами, которые способствуют эрозии электродов. Поэтому для таких плазмотронов характерны высокая удельная эрозия, составляющая $10^{-5}...10^{-4}$ г/Кл и более, а также большая загрязненность плазмы электродными материалами. Достоинством плазмотронов с водяной стабилизацией является возможность получения высоких температур плазмы (рис. 4) и напряженности электрического поля дуги (рис. 5). Например, в плазмотроне Гердиена при диаметре водяной трубки 2,4 мм и токе 1450 А получена плазма с температурой порядка 55 000 К.

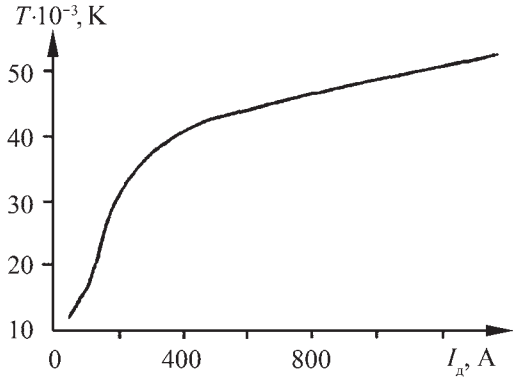


Рис. 4. Зависимость температуры плазмы *T* от тока дуги $I_д$ в плазмотронах с водяной стабилизацией

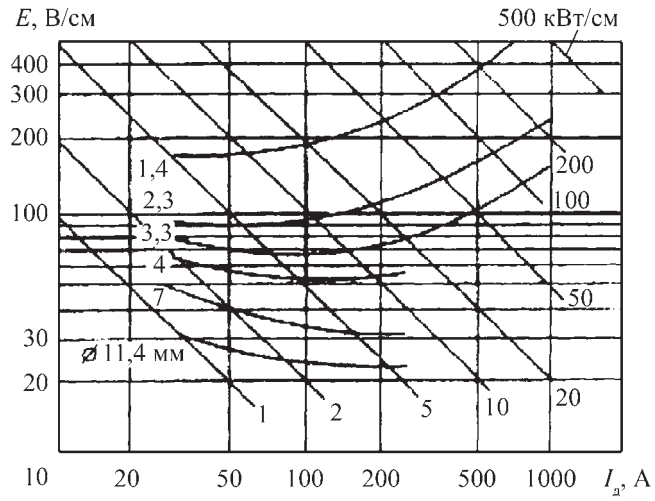


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики каналовой дуги при различных диаметрах канала

В плазмотронах с газовихревой стабилизацией дуги такого уровня температуры достичь невозможно. С уменьшением диаметра водяной трубки напряженность, мощность дуги и ее температура возрастают. Вольт-амперная характеристика водостабилизированной дуги имеет U-образную форму (рис. 5). Физическое объяснение этому факту следующее. С увеличением силы тока холодный газ, окружающий столб дуги, прогревается за счет излучения, молекулярной теплопроводности и конвекции тепла настолько, что в нем начинается процесс ионизации. Поперечное сечение столба дуги при этом увеличивается, а электрическое сопротивление и напряжение дугового разряда падают. При некотором значении тока образующаяся водяная трубка настолько сильно термически сжимает столб дуги, что он уже не может расширяться с ростом тока. Разрядный ток концентрируется в центральной части дугового столба, еще более разогревая его. Это приводит к температурному насыщению проводимости газа, и уменьшение сопротивления дуги замедляется, вызывая возрастание ее вольт-амперной характеристики.

Плазмотроны с магнитной и магнитно-водяной стабилизацией характеризуются относительно невысоким КПД (28...55 %), довольно большой эрозией электродов ((0,3...1)·10^{-5} г/Кл) и среднемассовой температурой пароводяной плазмы около 2700...3500 К. Уровень мощности исследованных дуговых установок такого типа не превышает 60 кВт.

Важным шагом в дальнейшем развитии дуговых генераторов пароводяной плазмы стала попытка использования стабилизирующего действия парового вихря на столб электрической дуги в целях создания эффективного паровихревого плазмотрона. В это время газовихревые, например воздушные, плазмотроны получили уже широкое распространение. Они имеют высокие характеристики, работают стабильно, длительно (сотни часов), в широком диапазоне мощностей (от сотен ватт до десятка мегаватт), с КПД 80...90 %.

Однако простая замена рабочего вещества с воздуха на водяной пар сразу к успеху не привела. Здесь большую роль играет специфичность водяного пара, отличающая его от воздуха и прочих газов. Показатель этого – большая эрозия медных электродов при работе на паре – около 10^{-4} г/ Кл, что на несколько порядков выше, чем при использовании воздуха, и неустойчивость режима работы по всем параметрам. На сегодняшний день плазмотроны с пароводяной плазмой, такие как "Аквaплаз", "Мультиплаз", "Плазар" и другие, не могут быть широко использованы в промышленности по причине очень низкого термического

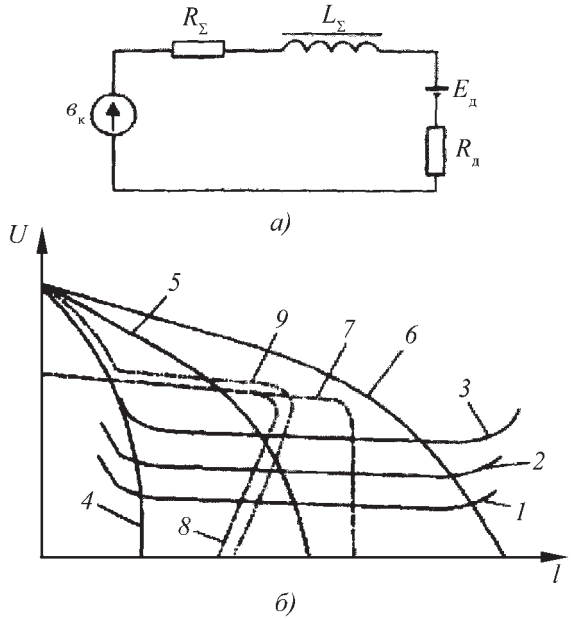


Рис. 6. Схема замещения электрической цепи системы источник – дуга (*а*) и семейство статических ВАХ$_д$ и ВАХ$_и$ (*б*): *1–3* – ВАХ$_д$; *4–9* – ВАХ$_и$

КПД (28...35 %) и пока остаются перспективными лабораторными разработками.

Помимо плазмотронов существенное влияние на процессы, происходящие в плазменной дуге, оказывают электрические параметры системы источник тока – дуга. Схема замещения цепи источник – дуга представлена на рис. 6, *а*, а статические вольт-амперные характеристики дуги (ВАХ$_д$) и источника (ВАХ$_и$) – на рис. 6, *б*. Семейство ВАХ$_д$ (кривые *1–3*) можно условно разделить на три характерных участка: падающий ($I_д$ < 50 А); независимый ($I_д$ = 50...400 А); возрастающий ($I_д$ > 400 А).

Уравнение электрического равновесия системы источник – дуга можно представить в следующем виде [4]:

$$U_в = I_\Sigma R_\Sigma + I_\Sigma (dI/dt) + E_д + IR_д , \qquad (17)$$

где $U_в$ и I – соответственно мгновенное значение напряжения холостого хода выпрямителя и тока в цепи источник – дуга; E – напряженность электрического поля на независимом участке ВАХ$_д$, представленное в схеме замещения в виде противоЭДС; $R_д$ – нелинейное омическое сопротивление (положительное на возрастающем участке ВАХ$_д$ и отрицательное на падающем); R_Σ и l_Σ – приведенные к цепи выпрямленного тока суммарное активное сопротивление и индуктивность источника соответственно.

Для трехфазного двухполупериодного выпрямителя:

$$U_{в} = \frac{\pi}{3} U_{ч} \sin\left(wt + \frac{\pi}{6}\right), \qquad (18)$$

где $U_{ч}$ – эффективное напряжение холостого хода выпрямителя.

Наклон $ВАХ_{д}$ зависит от степени сжатия столба дуги, а напряженность электрического поля определяется размерами дуговой камеры плазмотрона и параметрами его работы (длина закрытого и открытого участков дуги, расхода плазмообразующего газа и др.). В зависимости от схемных решений неуправляемого выпрямителя естественная $ВАХ_{и}$ (рис. 6, *б*) может быть крутопадающей (кривые *5*, *6*), а при введении обратных связей в управляемый выпрямитель (инвертор) – как изображена кривыми *7–9*.

В неуправляемых выпрямителях при ограничении $U_{ч}$ не более 300 В в области токов свыше 150 А пологость $ВАХ_{и}$ становится чрезмерной, что влияет на технологическую устойчивость плазменной дуги.

В управляемых тиристорных выпрямителях введением отрицательной обратной связи по току (связи по отклонению) достигается $ВАХ_{и}$, изображенная на рис. 6, *б* (кривая *7*). Таким образом, обеспечивается стабильность тока дуги при колебаниях ее длины, расхода плазмообразующего газа и напряжения питающей сети. Еще более высокие свойства плазменной дуги наблюдаются при введении дополнительной положительной обратной связи по возмущению. В этом случае $ВАХ_{и}$ (кривая *8*) отличается возрастанием тока дуги при увеличении длины дуги. Идеальной $ВАХ_{и}$ с учетом всех факторов устойчивости системы [4] и высокого КПД источника является кривая *9*. Это достигается за счет комбинации двух выпрямителей: с рабочим участком $ВАХ_{и}$ (кривая *8*) и маломощного вольтодобавочного с участком $ВАХ_{и}$ (кривая *4*).

Ключевой проблемой системы источник – дуга является вопрос ее устойчивости. Именно от этого зависят все технологические свойства плазменных технологий. Общеизвестно, что для статической устойчивости горения дуги $ВАХ_{и}$ должна быть круче $ВАХ_{д}$, а динамическая устойчивость системы определяется из уравнения (17) при следующих допущениях [4]: непрерывность тока дуги при пульсирующем напряжении на выходе выпрямителя обеспечивается оптимальной величиной индуктивного силового трансформатора и сглаживающего дросселя; отсутствуют автоколебания тока.

Представленные в сжатом виде основные теоретические вопросы электро- и теплофизических основ плазменных процессов показывают общие тенденции их развития. Более подробно с этими вопросами можно ознакомиться в литературе [3, 6, 8].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Патон Б.Е.** Плазменные технологии на рубеже веков // Автоматическая сварка. 2000. № 2. С. 3–6.
2. **Балановский А.Е.** Развитие плазменной технологии: сварка, наплавка, упрочнение, резка // Сварка в Сибири. 1999. № 2. С. 8–19.
3. **Эсибян Э.М., Гладкий П.В., Никифоров Н.И. и др.** Оборудование для плазменной сварки, наплавки, резки // Машиностроение: Энциклопедия. Т. IV–6: Оборудование для сварки. М.: Машиностроение, 1999. С. 369–375.
4. **Эсибян Э.М.** Воздушно-плазменная резка // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 6–18.
5. **Лащенко Г.И.** Обеспечение точности изготовления сварных конструкций // Сварщик. 2003. № 3. С. 17–21.
6. **Михайлов Б.И.** Электродуговые генераторы пароводяной плазмы // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9. № 4. С. 597–612.
7. **Васильев К.В.** Особенности плазменно-дуговой резки в азотно-кислородных смесях (обзор) // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 21–25.
8. **Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др.** Микроплазменная сварка. Киев: Наук. думка, 1979. 248 с.
9. **Нефедов Б.Б., Лялякин В.П.** Развитие плазменной сварки и наплавки за рубежом // Сварочное производство. 1998. № 3. С. 21–27.
10. **Переплетчиков Е.Ф.** Плазменная наплавка // Сварщик. 2000. № 2. С. 8–11.

(Продолжение следует.)

Александр Евгеньевич Балановский, канд. техн. наук

М.А. Горьков, А.В. Власов *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Гибка малопластичных металлов на малый радиус

Сформулированы основные требования, предъявляемые к технологическим процессам гибки на малый радиус, применяемым в автомобильной промышленности. Дан краткий анализ ряда технологических процессов, основанных на эффекте повышения пластичности материала при увеличении гидростатического давления в очаге пластической деформации. Предложен новый способ гибки на малый радиус малопластичных металлов. Процесс формоизменения детально изучен с помощью конечно-элементного анализа в программе LS-DYNA, результаты которого подтверждены серией физических экспериментов.

The paper considers some flanging processes, which are based on hydrostatic pressure increasing principle and main requirements to near-zero bending processes with reference to automobile industry. New flanging method for low-ductility materials (such as aluminum alloys) has been developed and simulated by finite-element method (FEM) in LS-DYNA. The results of FEM simulation show that this method has high efficiency. These theoretical calculations are confirmed by the series of experiments.

Гибку листового металла на малый радиус применяют в автомобильной промышленности при штамповке внешних панелей облицовочных деталей автомобилей как операцию, предшествующую их сборке. Она имеет наибольшее влияние на дальнейшее формоизменение и качество окончательной детали.

Под малым радиусом подразумевается радиус $R = 0{,}5S$, где S – толщина штампуемого металла. До недавнего времени практически все автомобили имели стальной кузов толщиной $S = 0{,}8$ мм, однако в последнее десятилетие наметилась тенденция к применению алюминиевых сплавов (АС) толщиной $S = 1$ мм. Сопоставимые по прочности со сталью они имеют плотность почти в три раза ниже, высокую коррозионную стойкость; но при этом низкий запас пластичности не позволяет применять традиционные технологии для их обработки. В настоящее время во всех крупных автомобильных компаниях проводят исследования, связанные с внедрением АС [1].

Разработка способа гибки на малый радиус

В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре "Технологии обработки металлов давлением" несколько лет проводят исследования по гибке АС на малый радиус. Как известно, повышение гидростатического давления (ГСД) в очаге деформации способствует повышению пластичности материала [2]. Этот физический эффект был положен в основу всех разработанных схем деформирования [1]. Стоит отметить, что применение некоторых из них позволяло получать образцы с поверхностью высокого качества без трещин и разрывов. К сожалению, ни один способ не удовлетворяет в совокупности всем приведенным ниже требованиям:

– отсутствие трещин и разрывов для надежной работы соединения в течение всего срока службы автомобиля;

– высокое качество лицевой поверхности детали, необходимое для дальнейшего нанесения покрытий, а также обеспечения надлежащего товарного вида;

– возможность получения радиуса гиба $R \leq 0{,}5S$, что продиктовано эстетическими требованиями автомобильных компаний во всем мире;

– возможность применения к деталям, имеющим изогнутую кромку;

– стойкость инструмента, достаточная для промышленного применения (применение упругих элементов в конструкции штампа в качестве деформирующих сильно снижает их ресурс);

– возможность использования универсального оборудования, т.е. инструмент должен двигаться по вертикали.

Реализация в промышленности большинства предложенных способов требует разработки специализированных единиц оборудования или целых линий, например для горизонтального движения инструмента.

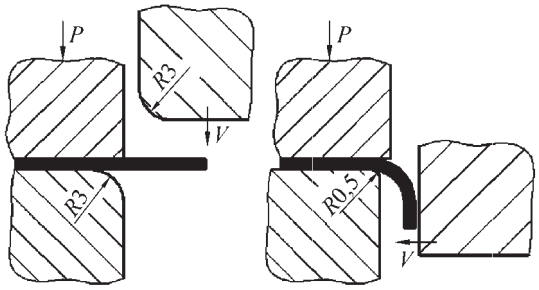


Рис. 1. Гибка на 90° с малым радиусом с горизонтальным движением инструмента

Наиболее полно удовлетворяющим этим требованиям является способ, показанный на рис. 1, который состоит их двух стадий [3]. На первой стадии происходит обычная гибка на 90° с радиусом не менее трех толщин, а на второй – деформирование фланца инструментом, движущимся горизонтально. За счет возникающих контактных сил трения между заготовкой и матрицей ГСД в очаге деформации возрастает и увеличивается ресурс пластичности металла. Единственным и главным недостатком этого способа является необходимость реализации горизонтального движения инструмента, а в случае с внешней панелью облицовочной детали автомобиля их требуется несколько.

Замена в данной схеме горизонтального движения инструмента на второй стадии на вертикальное (рис. 2) не дает должного эффекта. Возникающее трение между деталью и матрицей также способствует повышению сжимающих напряжений в зоне гиба, однако силы трения между деталью и пуансоном дают обратный эффект. На внешней поверхности заготовки из-за трения при движении инструмента возникают значительные растягивающие напряжения. В результате суммарный эффект оказывается незначительным. Результаты математического моделирования схемы на рис. 2 подтвердили этот вывод.

Смена направления движения инструмента приводит к тому, что силы трения на поверхности между пуансоном и заготовкой становятся активными, т.е. дают не отрицательный, а положительный эффект.

В схеме, показанной на рис. 3 (вторая стадия), использовано трение между движущимся инструментом и внешней поверхностью заготовки для снижения растягивающих напряжений на внешнем волокне в очаге пластической деформации. В результате получается своего рода эффект "заталкивания" металла в зону формирования малого радиуса. Нижняя матрица имеет выступ несколько меньший, чем толщина деформируемого металла для создания "подпора". Очаг деформации становится больше по сравнению с предыдущими схемами за счет наличия угловой кромки инструмента.

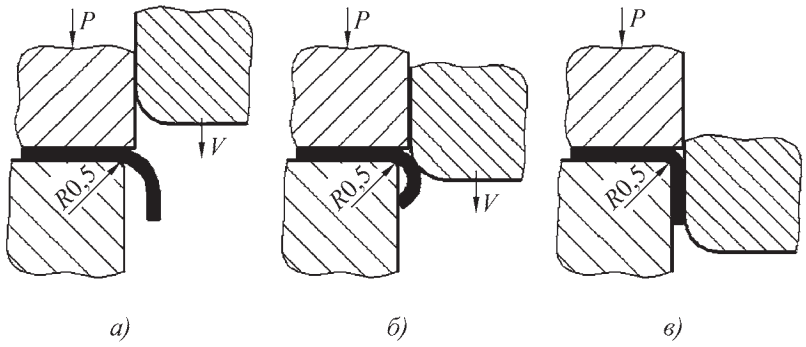


Рис. 2. Вторая стадия модифицированного способа гибки на 90° жестким пуансоном с вертикальным движением инструмента:
а – исходное положение; *б* – промежуточное положение; *в* – конечное положение

На качество детали влияют угол пуансона α, радиус скругления пуансона *R* и зазор между заготовкой и инструментами. Влияние каждого из этих параметров на геометрию конечной детали и степень использования запаса пластичности (СИЗП) можно определить при помощи моделирования методом конечных элементов.

Механика предложенной схемы процесса, результаты расчета и физического эксперимента, а также влияние геометрии инструмента на пластичность заготовки описаны ниже.

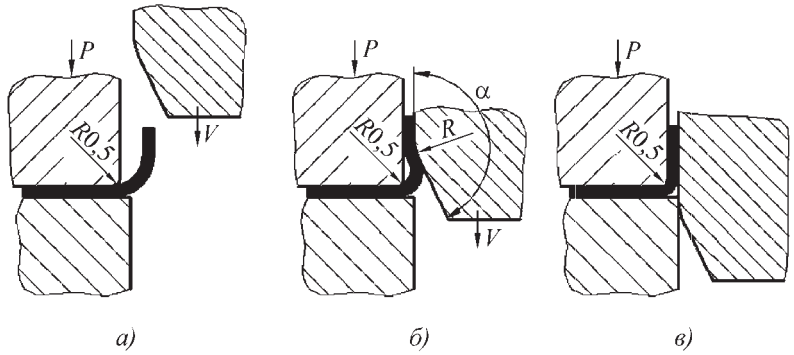


Рис. 3. Вторая стадия нового способа гибки на 90° жестким пуансоном с вертикальным движением инструмента:
а – исходное положение; *б* – промежуточное положение; *в* – конечное положение

Математическое моделирование и физический эксперимент

Для исследования механики деформирования и напряженно-деформированного состояния заготовки создана конечно-элементная модель деформирования образца толщиной 1 мм в программе LS-DYNA. Модель построена на основе

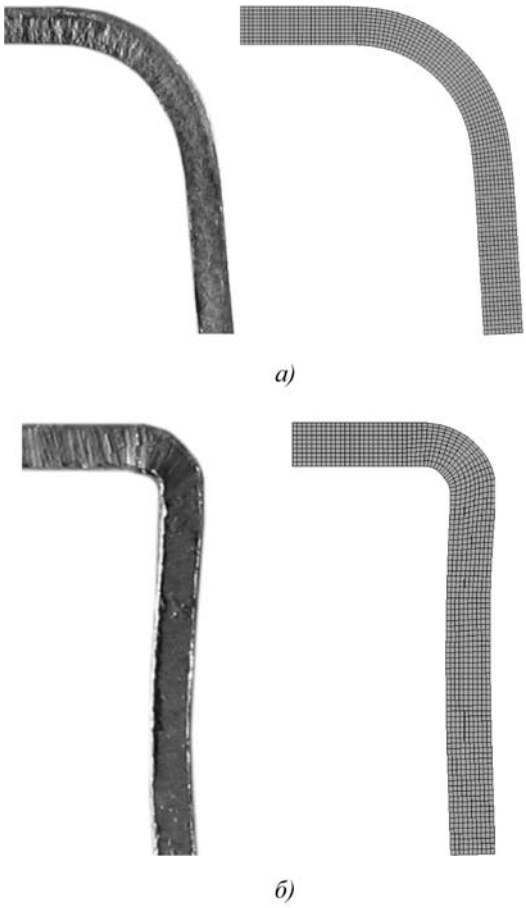


Рис. 5. Сравнение результатов физического эксперимента (*слева*) и математического моделирования (*справа*):
а – гибка на радиус *R*3; *б* – гибка на радиус *R*0,5

плоских конечных элементов. В расчете исследованы схемы с углом наклона α, равным 10, 15, 20, 25, 30 и 40°, а также с радиусом скругления *R*, равным 5, 10 и 20 мм. Зазор варьировали на уровнях 1,1, 1,05 и 1,02 мм.

В результате расчета этих моделей удалось установить влияние угла α на СИЗП и геометрию конечной детали. При увеличении угла пластичность увеличивалась незначительно, и лишь при 40° произошло резкое ее увеличение, но при этом часть металла с внешней поверхности была "срезана" за счет трения. Также в этом случае произошло значительное искривление образца.

При α = 10° фланец получился практически прямым. При увеличении радиуса пластичность снизилась незначительно, но при этом исчез изгиб.

Уменьшение зазора приводит к повышению пластичности и также позволяет получить прямой фланец, однако оптимальным является зазор 1,05 мм. Стоит отметить, что пружинение в данном процессе крайне незначительное, что подтверждено физическими экспериментами.

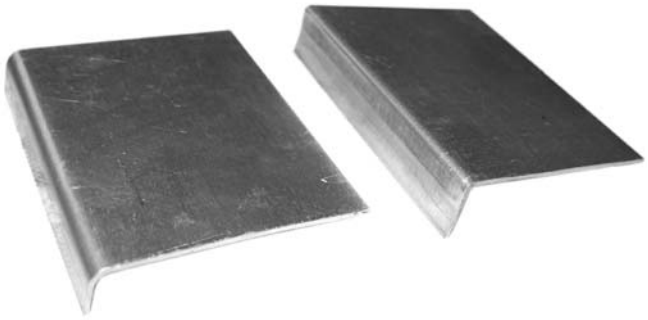


Рис. 6. Фотографии образцов после гибки на радиус *R*3 (*слева*) и *R*0,5 (*справа*)

Результаты расчета модели показаны поэтапно на рис. 4 (см. цветную вкладку).

На рисунке хорошо видно, что в процессе деформации с уменьшением радиуса среднее напряжение на внешнем волокне не только не растет, а даже несколько падает, что является причиной повышения пластичности материала в очаге деформации.

Экспериментальное исследование проводили на специально сконструированном штампе в лаборатории кафедры "Технологии обработки металлов давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ниже представлены образцы после гибки на радиус *R*3 (рис. 5, *а*) и после деформирования пуансоном с углом 10° и радиусом 10 мм (рис. 5, *б*).

Из рис. 6 видно, что результаты расчета деформированного состояния подтверждаются физическим экспериментом. Полученный радиус на внутренней поверхности образца равен половине толщины заготовки.

В исследованном процессе деформирующая поверхность пуансона на второй стадии представляет собой две поверхности, расположенные под углом и скругленные радиусом. Анализ показывает, что возможно существование другой формы деформирующей поверхности (например, эллиптической), эффективность влияния которой на средние напряжения на внешнем волокне будет выше. Форму отогнутого фланца при этом можно максимально приблизить к прямолинейной. Однако эти выводы требуют подтверждения расчетом и экспериментальными исследованиями.

Выводы

Предложен новый технологический процесс гибки на малый радиус, основанный на использовании эффекта повышения пластичности материала при снижении средних напряжений в очаге пластической деформации. Процесс не требует создания сложной штамповой оснастки и может быть применен для гибки деталей с линией гиба различной кривизны.

Способ может быть использован в различных отраслях промышленности, где необходимо получение

малого радиуса гиба на материалах с невысокой пластичностью. Вертикальное движение инструмента позволяет реализовать процесс на стандартном оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Власов А.В., Горьков М.А.** Технологические процессы сборки кузовных деталей автомобилей из алюминиевых сплавов и методы их расчета // Кузнечно-штамповочное производство: перспективы и развитие. Екатеринбург: ГОУ ВПО "УГТУ-УПИ", 2005. С. 194–200.

2. **Богатов А.А.** Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособие для вузов. Екатеринбург: ГОУ ВПО "УГТУ-УПИ", 2002. 239 с.

3. **Власов А.В., Горьков М.А.** Оценка предельного формоизменения алюминиевых заготовок при выполнении операции зафланцовки // Изв. ТулГУ. Серия: механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: ТулГУ, 2004. Вып. 1. С. 68–77.

Максим Александрович Горьков, инженер;
Андрей Викторович Власов, д-р техн. наук

УДК 621.961

А.М. Илинич, С.Ф. Головащенко *(Москва)*

Влияние технологических параметров обрезки на предельную деформацию удлинения высокопрочных листовых двухфазных сталей

Рассмотрена обрезка листовых деталей из двухфазных легированных сталей с пределами прочности 500 и 600 МПа. Определено влияние зазора и способа обрезки на способность материала к удлинению вдоль линии реза в последующих технологических операциях штамповки. Рассмотрены две технологии обрезки: традиционная технология и обрезка радиусным верхним ножом с применением эластичного подпора отхода. Предложена новая технология обрезки с подпором, позволяющая получить лучшие результаты.

The article considers shaving of sheet details made of two-phase steels with breaking point of 500 and 600 MPa. Influence of backlash and shaving method on ability of material to stretch along cutting line during following technological operations of forging have been developed. Two technologies of shaving are considered in the article: traditional technology and the shaving by the upper round-nose tool with use of the elastic dam of the off-cuts. The new technology of shaving with the dam is considered.

Введение. Двухфазные стали находят применение как в кузовных, так и в несущих элементах конструкции автомобиля. Их использование позволяет уменьшить массу и увеличить прочность кузова. Данные стали характеризуются наличием 15...20 % мартенсита; их легируют магнием и кремнием.

К технологии обрезки предъявляют следующие требования:

отсутствие дефектов, таких как заусенец и волоски;

минимальные геометрические искажения поверхности реза (непараллельность, утяжина).

В кузовном производстве за операцией обрезки обычно следует операция зафланцовки. Если поверхность разделения вогнута, на стадии зафланцовки на некоторых участках возникают направленные вдоль линии реза растягивающие напряжения, придавая этим участкам схожесть с операцией отбортовки. Пример такого участка показан на рис. 1. В этом случае к указанным выше требованиям добавляется требование минимальной деформации удлинения, воспринимаемой заготовкой вдоль линии реза без разрушения. Некачественно выполненная обрезка и/или превышение деформаций разрушения приводит к тому, что в этих местах образуются трещины, направленные перпендикулярно к поверхности разделения (рис. 1).

В практике листовой штамповки выполнение упомянутых требований осуществляют регулировкой зазора, который применяют меньше чем 10 % от толщины материала. У кузовных деталей из высокопрочной стали это соответствует зазору меньше 0,06 мм. Высокая прочность разрезаемого материала и большие габариты деталей приводят к упругим деформациям и перекосам инструмента, превышающим указанную величину. Особенно сильно страдают криволиней-

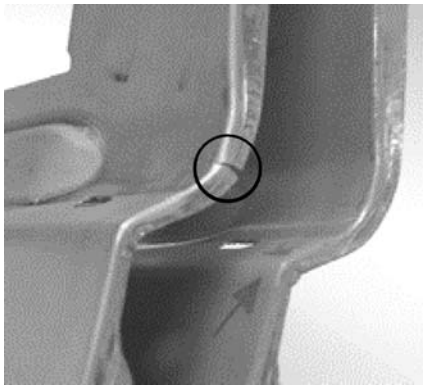


Рис. 1. Трещина (обведена кружком), образовавшаяся во время зафланцовки на криволинейном участке наружной панели двери под воздействием растягивающих напряжений

ные участки, где точность нужна больше всего. Это приводит к завышенным ценам на оснастку, и их решение превышает возможности инструментального производства обрезных штампов крупногабаритных деталей, что ведет к появлению заусенца. Поэтому приходится вводить дополнительную операцию по удалению заусенцев, выполняемую вручную.

Это требует разработки технологии, позволяющей увеличить диапазон зазора, что снизит требования к точности изготовления штампа, затрат и времени на его изготовление.

При обрезке высокопрочных двухфазных сталей с пределами прочности 500 и 600 МПа (далее для краткости будем называть их сталь 500 и сталь 600) традиционный технологический процесс (рис. 2, *а*) обеспечивает хорошее качество разделения для зазоров до 20 % от толщины материала. Начиная с зазора в 20 %, появляется заусенец. При резке с подпором (рис. 2, *б*) заусенец либо отсутствует, либо его размеры весьма малы во всем исследованном диапазоне зазора (5...50 %). Однако при этом увеличивается утяжина.

Здесь рассмотрено влияние способа обрезки и параметров технологического процесса на максимальные деформации удлинения, направленные вдоль линии реза, воспринимаемые заготовкой. Данное исследование необходимо для обрезки кузовных деталей сложной формы, которые в дальнейшем зафланцовывают. В литературе, посвященной вопросам разделительных операций, указывают, что максимальная деформация удлинения или коэффициент отбортовки

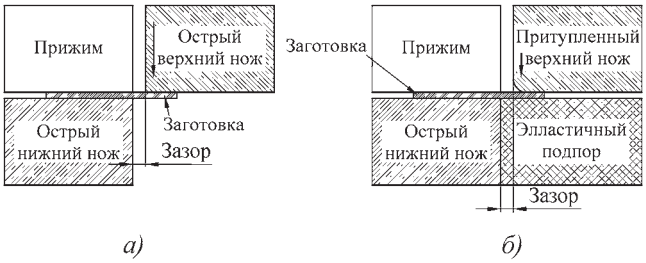


Рис. 2. Схемы технологических процессов:
а – традиционный технологический процесс обрезки; *б* – обрезка с подпором

напрямую зависят от наличия или отсутствия заусенца на поверхности разделения.

Отсюда следует, что процесс обрезки с применением подпора должен показывать хорошие результаты и по удлинению. Аналогичный показатель традиционного процесса должен ухудшаться, как только на заготовке появляется заусенец, т.е. для зазоров свыше 20 % от толщины детали.

Цели и задачи. Целью исследования являлось изучение влияния способа обрезки и зазора между режущим инструментом на максимальную деформацию растяжения, направленного вдоль линии реза, воспринимаемую материалом до разрушения.

Рассматривали два технологических процесса: традиционный и обрезку с подпором (рис. 2). Обрезка с подпором предотвращает изгиб отхода в процессе обрезки. Под заготовку со стороны верхнего ножа устанавливают подпор, выполненный из эластичного материала (обычно полиуретана). Закругление режущей кромки верхнего ножа (радиус принимают из расчета 5...10 % от толщины разрезаемого материала) позволяет направить разрушающую трещину от кромки нижнего ножа вместо кромки верхнего ножа, как это происходит при традиционном процессе. Это позволяет избавиться от заусенца, который остается на отходе.

Технологический зазор варьировали в виде дискретных значений: 5, 10, 15, 20, 30, 40 и 50 % от толщины материала.

Методика проведения эксперимента. Последовательность проведения эксперимента представлена на рис. 3. На первом этапе осуществляли разделение заготовок исследуемым технологическим процессом при заданном технологическом зазоре. Образцы размером 12,7×75 мм нарезали из полосы шириной 75 и длиной 300 мм, как показано на рис. 3. Пунктирной линией показана линия реза, выполненная опытным процессом, сплошной – вспомогательная линия реза, выполненная на гильотинных ножницах. Скорость инструмента при резке составляла 0,5 мм/с.

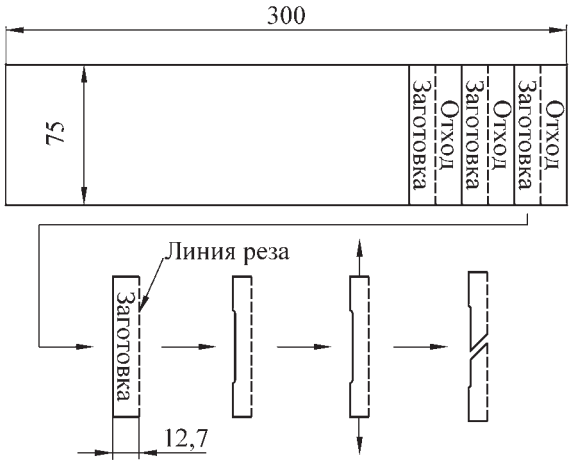


Рис. 3. Последовательность проведения эксперимента

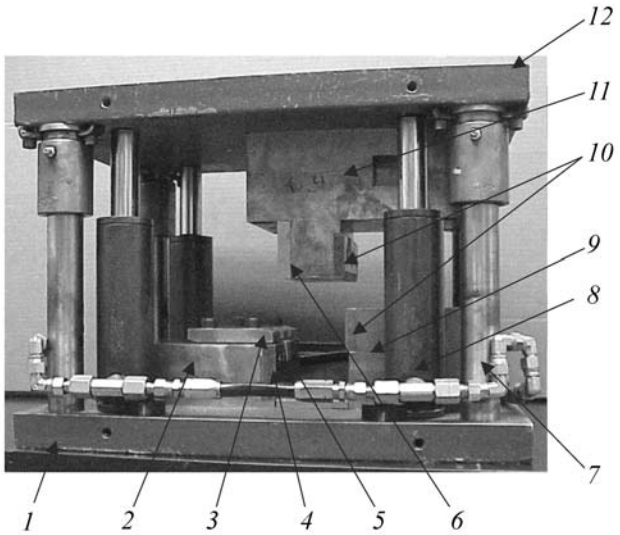


Рис. 4. Экспериментальная оснастка:
1 – нижняя плита; *2* – нижний блок; *3* – прижим; *4* – нижний нож; *5* – образец; *6* – верхний нож; *7* – направляющие колонки; *8* – возвратные цилиндры; *9* – противоотжим; *10* – направляющие плиты; *11* – верхний блок; *12* – верхняя плита

Обрезку осуществляли в штампе, показанном на рис. 4. Нижний и верхний ножи крепили на соответствующие блоки с помощью болтов. Блоки были отрегулированы таким образом, чтобы непараллельность режущих кромок ножей не превышала 0,01 мм по длине кромки.

Зазор между режущими кромками изменяли с помощью прокладок, которые устанавливали между верхним ножом и верхним блоком. Для исключения возможности раскрытия зазора во время обрезки применяли штамповый блок с четырьмя колонками; в дополнение на нижнюю плиту установили массивный противоотжим. При ходе вниз направляющая на верхнем блоке входит в контакт с направляющей на противоотжиме, препятствуя раскрытию зазора.

После обрезки, чтобы исключить дополнительный влияющий фактор, проводили обработку вспомогательной линии реза, улучшая качество поверхности разделения. Для этого использовали две методики:

электроискровым методом отрезали небольшой участок заготовки по форме половины стандартного образца на растяжение (см. рис. 3);

в дальнейшем, для ускорения и удешевления процесса, перешли на зачистку вспомогательной поверхности разделения шкуркой.

На следующем этапе заготовку закрепляли в зажимах испытательной машины, как показано на рис. 5, и к ней присоединяли датчик удлинения с базой 25,4 мм. Затем заготовку растягивали до разрушения с записью параметров силы и показаний датчика удлинения. При растяжении заготовки использовали двухступенчатый скоростной режим. При деформациях

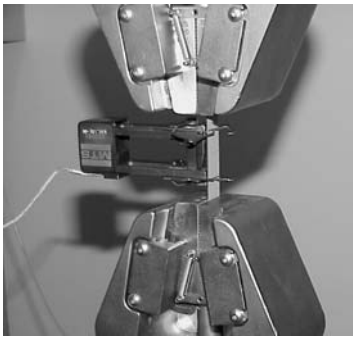


Рис. 5. Опытный образец в зажимах испытательной машины Instron с датчиком удлинения

заготовки до 1 % скорость движения рамы была равна 0,04 мм/с, при достижении порога в 1 % скорость возрастала до 0,21 мм/с.

Результаты. В экспериментах на растяжение наблюдали различные картины разрушения образцов. Всего было выявлено три схемы (рис. 6):

схема 1 – разрушение образца под углом, близким к 45°;

схема 2 – медленное раскрытие поперечной трещины;

схема 2+1 – комбинация первой и второй схем, когда образец начинает разрушаться по схеме 2, но окончательное разрушение происходит по схеме 1.

Установлено, что полученные удлинения находятся в строгой зависимости от вида разрушения. Для схемы 1 получены наибольшие удлинения, а для схемы 2 – наименьшие. Схема 2+1 занимает промежуточное положение между схемами 1 и 2, при этом лучшие результаты получали в случаях с минимальной длиной участка, разрушившегося по схеме медленного раскрытия трещины.

Для схем 2 и 2+1 поверхность реза в момент разрушения выглядит, как показано на рис. 7. На фотографии хорошо видны множественные мелкие трещины,

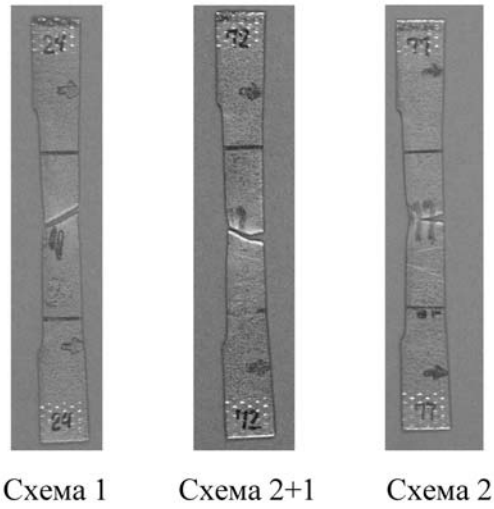


Рис. 6. Схемы разрушения при испытаниях образцов на растяжение

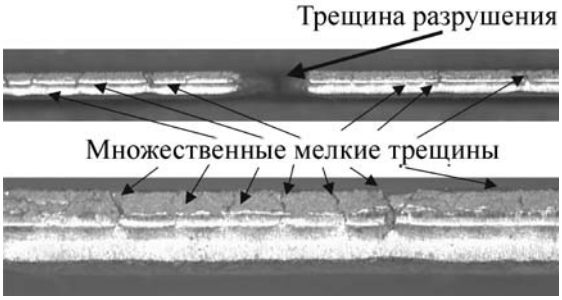


Рис. 7. Типичная картина разрушения образцов для схем 2 и 2+1

говорящие о том, что механизм разрушения не обусловлен единичным дефектом ножей.

Также тип разрушения можно определить по виду полученной зависимости силы отрезки от хода. На рис. 8 представлены типовые графики, получаемые для описанных выше схем разрушения.

Точками на графиках показаны моменты начала разрушения образцов. Сплошная линия соответствует схеме 1. Для этой схемы наблюдается наибольшая локализация очага пластической деформации, что сопровождается уменьшением площади поперечного сечения этой локальной области. На графике это соответствует участку от начала падения силы до разрушения (от начала левой стрелки до точки). Наблюдаемый процесс локализации можно разделить на две составляющих (рис. 9). Первая часть проходит с локализацией в достаточно большой области, поэтому напряжение падает незначительно (см. рис. 8, *кривая* для схемы 1, левая стрелка). Вторая часть процесса локализации происходит в весьма малой области, соизмеримой с толщиной материала. Поэтому на данном участке напряжение значительно падает, в то время как приращение деформации невелико (правая стрелка).

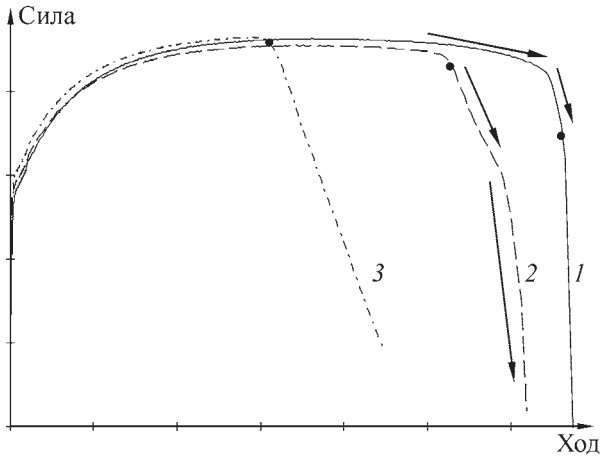


Рис. 8. Характерные кривые силы по ходу для разных схем разрушения:
1 – схема 1; *2* – схема 2+1; *3* – схема 2

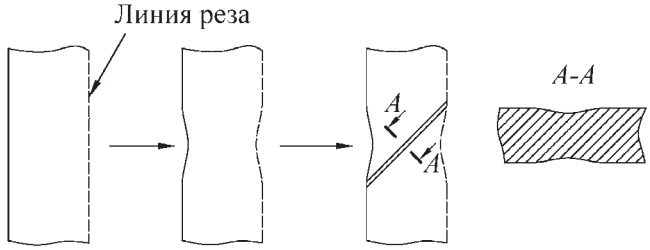


Рис. 9. Стадии процесса локализации очага пластической деформации для первой схемы разрушения

Штрихпунктирной линией *3* показан график разрушения по схеме 2. Локализации очага в данном случае не происходит. Уменьшение силы от точки начала разрушения, как видно из графика, носит линейный характер и связано с раскрытием трещины.

Штриховой линией *2* показан график схемы 2+1. Для этой схемы до начала разрушения наблюдается минимальная локализация очага, происходящая только по первой части процесса, описанного выше. От точки разрушения процесс развивается по схеме 2 (соответствующий участок обозначен на графике верхней короткой стрелкой). Дальше происходит окончательное разрушение образца, на этот раз протекающее аналогично разрушению по схеме 1 (этот участок обозначен на графике нижней длинной стрелкой).

На рис. 10 представлен график зависимости максимального удлинения вдоль линии реза от технологического зазора для стали 500 толщиной 0,65 мм. Каждая точка на графике получена как среднее для 10 образцов. Из графика видно, что традиционный процесс показывает хорошее удлинение для зазоров вплоть до 20 % от толщины материала. Дальше идет резкий спад. Причиной является заусенец, появляющийся при зазоре 20 % и быстро растущий с дальнейшим увеличением зазора. При этом, несмотря на наличие маленького заусенца для зазора 20 %, заметного

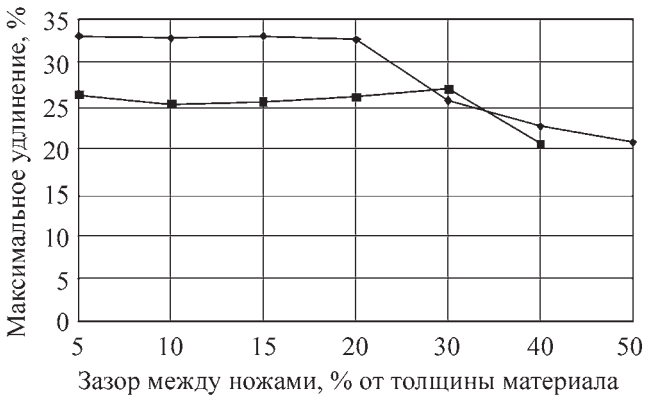


Рис. 10. Влияние зазора между режущими кромками инструмента на максимальное удлинение стали 500 толщиной 0,65 мм:
♦ – традиционная обрезка; ■ – обрезка с подпором

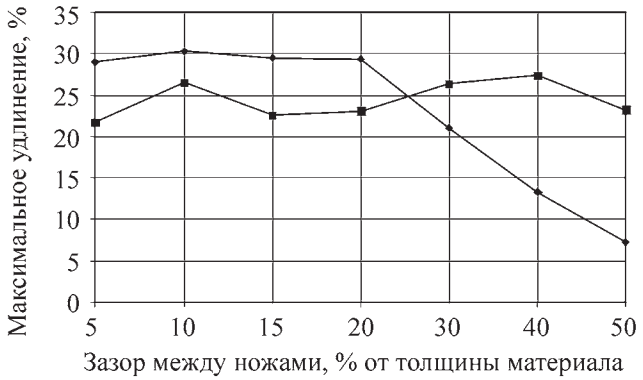


Рис. 11. Влияние зазора между режущими кромками инструмента на максимальное удлинение стали 600 толщиной 0,85 мм:

♦ – традиционная обрезка; ■ – обрезка с подпором

влияния на максимальную деформацию он не оказывает.

Обрезка с подпором показывает достаточно стабильные результаты для всех исследованных зазоров, однако, несмотря на отсутствие заусенца, они хуже результатов, показываемых традиционным процессом для зазоров меньших 20 %.

Результаты экспериментов на растяжение стали 600, представленные на рис. 11, хорошо согласуются с результатами, полученными для стали 500. Картина та же: традиционный процесс показывает хорошие результаты при зазорах до 20 %, обрезка с подпором показывает стабильные, но худшие результаты, чем традиционный процесс при малых зазорах.

Отличия следующие. У традиционного процесса свыше зазора в 20 % наблюдается более заметный, чем на стали 500, спад. Для зазора в 50 % наблюдали трехкратную разницу в максимальном удлинении. Второе отличие касается обрезки с подпором, которая ведет себя по-разному для больших зазоров (свыше 30 %). Как видно из рис. 10 и 11, для стали 500 характерен спад, в то время как для стали 600 – увеличение максимального удлинения.

Особое внимание хочется обратить на худшие, пусть и стабильные, результаты процесса с подпором у обоих материалов, несмотря на отсутствие заусенца. Этот факт идет в разрез с результатами, полученными для других материалов, и поэтому требует отдельного исследования.

Представленные результаты являются интегральными характеристиками, полученными при помощи датчика удлинения, который замерял деформацию участка заготовки длиной в 25,4 мм. Для того чтобы выяснить, что происходит в зоне локализации, на поверхность заготовки нанесли сетку в виде кругов. На рис. 12 представлены фотографии образцов с сеткой после разрушения, наглядно демонстрирующие разницу локального удлинения для трех вышеописанных схем разрушения.

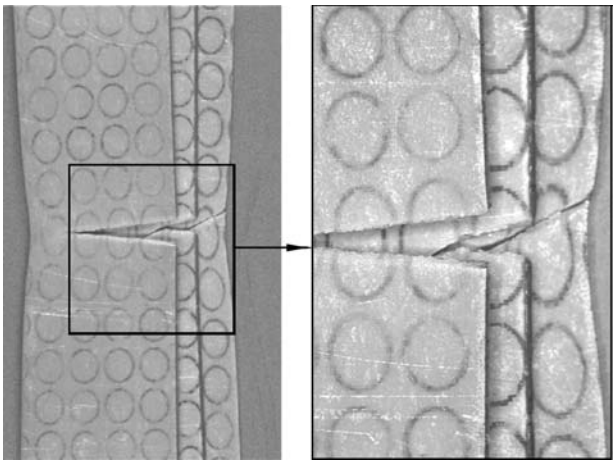


Рис. 12. Образцы из стали 500 толщиной 0,65 мм с сеткой после разрушения:

сверху – образец, разрушившийся по схеме 2; *посередине* – по схеме 2+1; *снизу* – по схеме 1

На рис. 13 показаны результаты замеров, нанесенные на график эмпирической кривой диаграммы предельных деформаций, взятой с сайта металлургической компании Mittal Steel.

Напомним, что область ниже кривой является зоной безопасного формоизменения, т.е. материал должен воспринимать деформации этой зоны без разрушения. Как видно, это правило не соблюдается для схем разрушения 2 и 2+1. Другими словами, образцы по схемам 2 и 2+1 разрушались намного раньше, чем это предполагалось. Данные экспериментов, где разрушение прошло по схеме 1, показаны на графике несколько выше кривой. Это обусловлено тем, что кривая лежит на границе безопасной области и области деформаций, при которых начинается локализация.

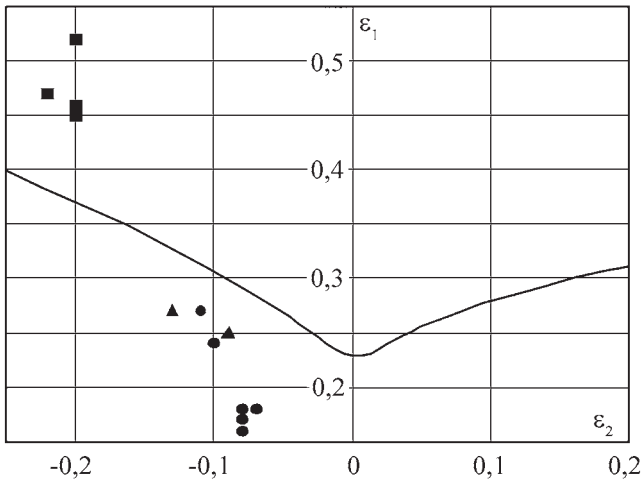


Рис. 13. Диаграмма предельных деформаций для стали 500 толщиной 0,65 мм:

—— – эмпирическая кривая; ■ – схема 1; ▲ – схема 2+1; ● – схема 2

Предлагаемая технология. Практика работы с другими материалами показывает, что замена радиусного верхнего ножа на острый в некоторых случаях может принести положительный эффект. Эта идея была опробована, но не принесла желаемых результатов. Начиная с зазора в 20 % от толщины материала, на заготовке появляется рваный заусенец (рис. 14).

Характер заусенца говорит о том, что трещина с равной вероятностью развивается как от верхнего, так и от нижнего ножа, оставляя заусенец на заготовке или на отходе соответственно. Поэтому на заготовке имеются как области с заусенцем, так и без него. Для того чтобы заусенец оставался на отходе, необходимо, чтобы трещина развивалась только от нижней режущей кромки. Для этого, в свою очередь, необходимо создать разные условия нагружения у верхнего и нижнего ножей. Предлагаемая схема заключается в использовании углового нижнего ножа (рис. 15).

Процесс показывает отсутствие заусенца для зазоров до 40 % (рис. 16). Отметим также меньшую, чем в случае обрезки с подпором и радиусной верхней кромкой, утяжину.

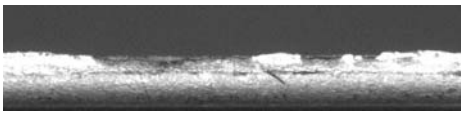


Рис. 14. Заготовка с заусенцем

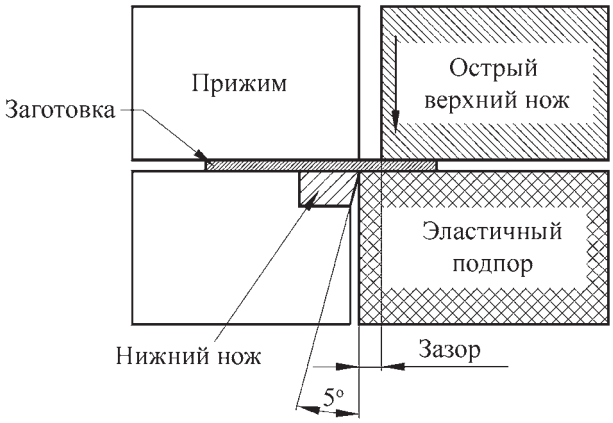


Рис. 15. Предлагаемый технологический процесс обрезки

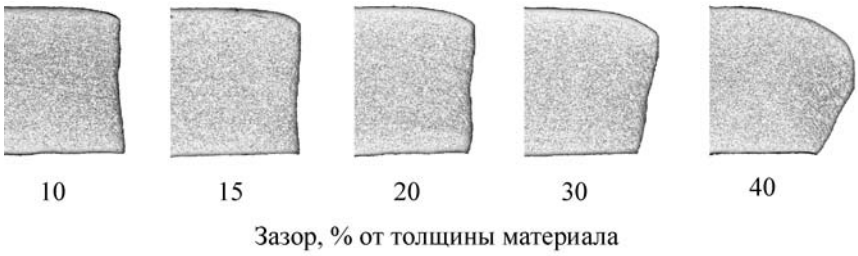


Рис. 16. Микрошлифы образцов из стали 500 толщиной 0,65 мм, отрезанные угловым нижним ножом

Рис. 17. Результаты испытаний на растяжение образцов из стали 500 толщиной 0,65 мм:
1 – образец отрезан традиционным способом; *2* – образец отрезан угловым нижним ножом

Результаты испытаний на растяжение образцов из стали 500 показаны на рис. 17. Для сравнения на графике показана кривая, полученная для традиционного технологического процесса. Как видно из графиков, предлагаемый процесс показывает близкие к традиционному процессу результаты для зазоров до 20 % от толщины материала и работает лучше для зазоров свыше 20 %.

Выводы

Для традиционного технологического процесса обрезки при зазоре между режущими кромками в диапазоне 5...15 % от толщины материала, а также при использовании острых ножей, получается высокое качество поверхности реза: отсутствие заусенца, минимальные геометрические искажения детали, высокая способность воспринимать деформацию удлинения вдоль линии реза. При зазорах более 15 % появляется торцовый заусенец, а при зазорах более 20 % резко падает максимальная деформация удлинения.

Процесс обрезки с применением подпора и верхней радиусной режущей кромки позволяет получить стабильные результаты во всем исследованном диапазоне зазоров, обеспечивая отсутствие или сведение к минимуму заусенца. Однако образцы, отрезанные этим процессом, в экспериментах на удлинение разрушаются раньше образцов, отрезанных традиционным процессом с оптимальным зазором 5...15 %.

Необходимо избегать обрезки с технологическими параметрами, которые при тестировании показывают схему разрушения образцов с наличием медленно раскрывающейся трещины, направленной перпендикулярно к поверхности разделения. В этом случае

сильно снижается запас пластичности материала, что приводит к преждевременному разрушению. Отметим также, что большинство конечно-элементных пакетов моделирования использует диаграмму предельных деформаций в качестве основы для определения опасных зон и возможности успешно отштамповать заготовку. Тот факт, что разрушение происходит в безопасной зоне, лежащей под кривой, указывает, что полученные результаты моделирования могут быть неприемлемы для практики.

Предложенная схема с подпором, в которой применяют верхний острый нож и нижний нож, выполненный под углом 5...15°, показывает меньшую утяжину и отсутствие заусенца для зазоров до 40 % включительно. Максимальная деформация удлинения образцов выше аналогичного показателя традиционного процесса. Данная технология рекомендуется к применению в том случае, если экономически нецелесообразно или технологически сложно выдержать зазор между ножами в рамках 5...15 % от толщины разрезаемого материла, как, например, при обрезке крупногабаритных кузовных деталей. В противном случае, более целесообразно применение традиционного технологического процесса.

Андрей Михайлович Илинич, инженер;
Сергей Федорович Головащенко, д-р техн. наук

УДК 669.3

Н.Б. Абрамова *(Орский гуманитарно-технический институт),*
Д.С. Григорьев *(Орский завод металлоконструкций)*

Нагрев заготовок из меди для ковки труб протяжкой на оправке

Приведены результаты экспериментов по нагреву заготовок из медного слитка, полученного в печи электронно-лучевого переплава ЭЛП-30. Определены оптимальные режимы нагрева. Представлены результаты исследования температурного поля в теле заготовки.

The results of experiments of copper blanks heating, made in the furnace of electron-beam fusion EBF-30 are given. The conditions of heating ensuring the economy and quality are defined. The investigations results of the temperature field in the blank body are presented.

В структуре затрат технологического процесса изготовления гильз кристаллизатора (ГК) для машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) наибольшие затраты связаны со стоимостью медной трубы-заготовки. Коэффициент использования металла при применении существующих технологий не достигает 40 %.

Анализ возможных альтернатив производства гильз кристаллизаторов для МНЛЗ показал, что для решения этих задач наиболее перспективны технологии изготовления гильз из литых заготовок объемным деформированием с последующей обработкой резанием. Изготовленные данными методами гильзы кристаллизаторов обладают значительно более высокой стойкостью по сравнению с изготовленными традиционными технологиями.

На машиностроительном концерне "ОРМЕТО-ЮУМЗ", г. Орск, заготовки для гильз кристаллизаторов изготавливали из медного слитка, полученного в печи электронно-лучевого переплава.

Технология ковки труб из бескислородной меди М-ЭЛП была разработана впервые. Режимы нагрева определяли экспериментально. В справочниках приведен температурный интервал для ковки меди 800...950 °С. Но этого недостаточно для разработки режима нагрева, обеспечивающего качество изделия.

При разработке технологии учитывали размеры заготовок и нагревательной печи, анализировали диапазон температур при посадке заготовок в печь.

Температурный режим в процессе ковки при протяжке труб-заготовок ГК существенно влияет на качество изделия и включает в себя:

– температуру печи при посадке заготовки в печь T_0;

– температуру нагрева заготовок излучением печи при выключенных горелках T_1;

– время выдержки t_1 при температуре T_1;

– интервал времени нагрева $t_1 - t_2$ от температуры T_1 до максимальной температуры T_2;

– скорость нагрева;

– интервал времени $t_2 - t_3$ выдержки заготовки в печи при температуре T_2;

– время выгрузки из печи $t_{выг}$;

– температуру заготовки при выгрузке $T_{выг}$;

1. Экспериментальные режимы нагрева заготовок

Маркировка; размеры заготовок, мм	Температура T_1, °С	Время выдержки при T_1, ч	Скорость нагрева, °С/ч	Время нагрева от T_1 до T_2, ч	Время выдержки при T_2 = = 900...920 °С, ч
№ 3; 180×210×185	400	1	100	5	0,3
№ 5; 196×190×350	350	1	80	6,8	
№ 7; 185×185×350	500...600	1	По мощности печи (180 °С/ч)	3,5...4	

2. Окончательные режимы нагрева заготовок

Маркировка; размеры заготовок, мм	Температура T_1, °С	Время выдержки при T_1, ч	Скорость нагрева, °С/ч	Время нагрева от T_1 до T_2, ч	Время выдержки при T_2 = = 900...920 °С, ч
№ 3; 180×185×210	350...370	1	По мощности печи (180 °С/ч)	3	0,3
№ 5; 190×196×350					
№ 7; 185×185×350					

– температуру заготовки в начале ковки $T_{нк}$;

– интервал времени от выгрузки из печи до начала ковки $t_{нк}$;

– температуру заготовки в конце ковки $T_{кк}$;

– время окончания процесса ковки $t_{кк}$;

– температуру T_{ni} заготовки после i-го подогрева;

– время i-го подогрева;

– температуру и время выгрузки заготовки из печи после i-го подогрева.

При разработке режимов нагрева критериями оптимальности являлись качество нагрева (равномерность нагрева по всему сечению заготовки и отсутствие трещин) и время нагрева. При быстром нагреве в результате температурного градиента по сечению заготовки в металле могут возникнуть термические напряжения. Поэтому скорость нагрева не должна превышать допустимой величины.

Время нагрева может быть рассчитано по формуле

$$t = \frac{S^2}{2\alpha\Delta t K_1}(t_{кон}^{ср} - t_{нач}^{ср}), \qquad (1)$$

где S – толщина пластины нагреваемого металла; α – скорость нагрева поверхности; K_1 – коэффициент формы; $t_{кон}^{ср}$, $t_{нач}^{ср}$ – средняя конечная и начальная температуры металла соответственно; Δt – разность температур по сечению нагреваемой заготовки при постоянной скорости нагрева.

При повторных операциях ковки время нагрева заготовок, остывших до нижнего предела установленных температур, можно уменьшить на 50 %.

Первоначально был рассмотрен следующий вариант режима нагрева заготовок. При проведении эксперимента варьируемыми параметрами были температура печи при посадке заготовки в печь T_1 и скорость нагрева заготовок. Заготовки нагревали каждую отдельно по указанным в табл. 1 режимам.

Окончательный вариант режима нагрева представлен в табл. 2.

Заготовки сажали в печь, нагретую до температуры T_0 = = 600 °С, где они нагревались до температуры T_1 = 350...370 °С за счет излучения печи при выключенных горелках. После выдержки при температуре T_1 заготовки нагревали до ковочной температуры по мощности печи (со скоростью 180 °С/ч) и выдерживали при температуре T_2 = 900...920 °С в течение 0,3 ч.

Интервал ковочной температуры контролировали пирометром частичного излучения модели "Смотрич-4П-05" на протяжении всего технологического процесса ковки трубы. Наличие

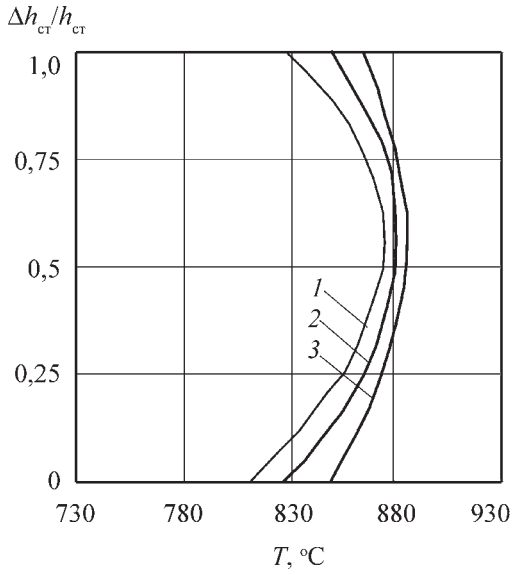


Рис. 1. Распределение температуры T в стенке заготовки толщиной $h_{ст}$ на начальной стадии процесса деформирования:
1 – материал заготовки медь М-ЭЛП; *2* – МС; *3* – М1Р

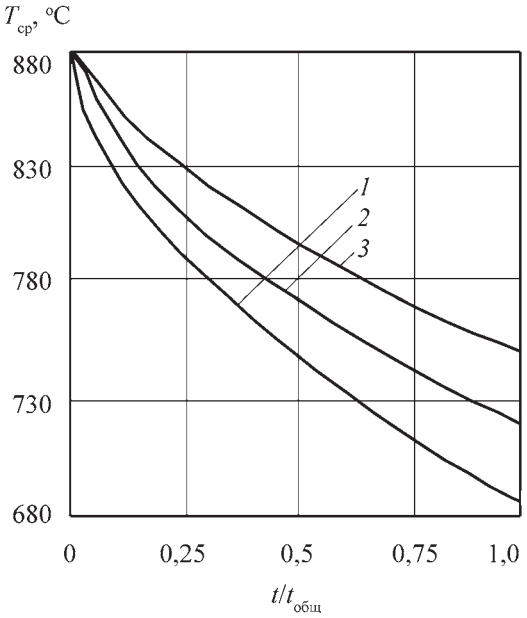


Рис. 2. Зависимость средней температуры $T_{ср}$ в стенке заготовки от времени обработки t:
1 – материал заготовки медь М-ЭЛП; *2* – МС; *3* – М1Р; $t_{общ}$ – общее время обработки заготовки

трещин контролировали визуально. Дефектов на заготовке не наблюдали.

Также были проведены исследования температурного поля в теле заготовки при протяжке медной трубы ковкой на оправке.

Температурное поле заготовки существенно влияет на процесс ее формообразования. Часть выделившегося тепла остается в заготовке, а часть в результате теплообмена всех видов (контактного, конвективного и теплопроводности) передается инструменту и окружающей среде.

На рис. 1 изображено распределение температуры T в стенке заготовки толщиной $h_{ст}$ на начальной стадии процесса деформирования. Шкала толщины стенки начинается со стороны оправки.

Исследования показали, что в зоне контакта заготовки с оправкой охлаждение металла происходит более интенсивно, чем в зоне контакта с бойками. В итоге процесс охлаждения стенки заготовки приобретает характер, представленный на рис. 2.

Вывод

Эксперименты показали, что нагрев медных заготовок под протяжку на оправке со скоростью 60 °С/ч неприемлем, так как под печи остывает быстрее, чем нагревается заготовка. Оптимальным является вариант, когда заготовку нагревают по мощности печи – со скоростью 180 °С/ч до температуры 900...920 °С; температура посадки в печь при этом должна находиться на уровне 600 °С.

Наталья Борисовна Абрамова, канд. техн. наук;
Денис Сергеевич Григорьев, инженер

В.Г. Ковалёв *(МГТУ им. Н.Э. Баумана),*
А.В. Рыбаков *(Московский государственный технологический университет "Станкин")*

Автоматизация проектирования технологических процессов листовой штамповки. Часть 1. Основы создания САПР. *Продолжение**

Формирование алгоритмов принятия комплекса технологических решений. При разработке алгоритмов автоматизированного проектирования часто нет возможности использовать информацию непосредственно о технологическом процессе, который применяют на производстве.

При формировании алгоритмов в настоящее время определились три группы задач. Первая группа задач сводится к поиску ранее разработанного технологического процесса для подобной детали или использованию стандартного технологического процесса. Вторая группа задач связана с выбором параметров блоков и пакетов штампов из стандартного ряда типоразмеров. Третья группа задач связана с разработкой новых технологических процессов и их оптимизацией. Для окончательного решения всех этих задач в САПР необходимо полное математическое описание для моделирования операций, процессов и т.д.

Модели формирования алгоритмов. При выборе варианта технологического маршрута учитывают размерные и физические характеристики детали и ее отдельных элементов. Теоретически число возможных вариантов технологического маршрута может быть равно числу сочетаний различных операций; например, если решается n задач и каждая имеет два варианта, то общее число решений (маршрутов) при формальном подходе равно 2^n. Очевидно, что часть

* Начало см. № 4, 2007 г.

вариантов сочетаний не имеет смысла, и поэтому в алгоритме выделяют только имеющие практический смысл варианты. Такие варианты выделяют с помощью ограничений, заложенных в алгоритме. Возможность управления качественными характеристиками детали путем изменения одного или нескольких параметров приводит к задаче моделирования процесса выявления таких параметров и определения области их действия.

Из многообразия практически возможных маршрутов выделяют маршруты, отвечающие следующим условиям: маршрут операций соответствует одному из типовых вариантов; технологическая оснастка допускает изготовление детали в соответствии с техническими требованиями; объем выпуска соответствует экономическим показателям; установлены технические характеристики оборудования и оснастки; режимы работы и возможности перехода с одного режима на другой; сформированы массивы параметров всех режимов работы; установлены технические средства автоматизации и информация для цикловых диаграмм каждого режима работы.

Схема принятия комплекса технологических решений представляет собой иерархическую структуру, где важную роль играют уровни сложности принятия решений и уровни приоритета. Уровни приоритета позволяют свести любую многоуровневую систему к двухуровневой. В этом случае система принятия комплекса решений может быть представлена в виде элементов принятия решений на своем уровне и передачи результатов решения на следующий уровень, имеющий n групп элементов, где принимаются решения в соответствии с ранее принятым определенным элементом решения верхнего уровня. При автоматизированном решении комплекса технологических задач холодной листовой штамповки любая двухуровневая система имеет два вида целей: цели принятия решений нижнего и верхнего уровней.

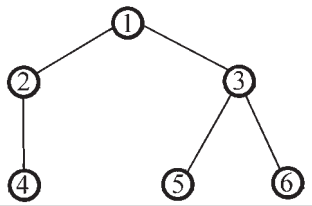
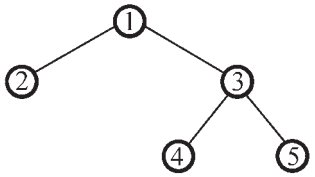
Методы формирования алгоритмов. В практике автоматизированного проектирования применяют два метода формирования алгоритмов: метод эталонов и общий метод. В первом случае алгоритм принятия решения состоит в установлении связи между конструктивными элементами исходной детали и типового образца технологического процесса по классификатору. Процесс создания алгоритма в общем случае заключается в том, что для номенклатуры деталей (a_1, a_2, ..., a_n), изготовляемых с помощью $m(\beta_1, \beta_2, ..., \beta_n)$ технологических операций необходимо определить технологический маршрут их изготовления. Здесь на каждую технологическую операцию имеют набор ограничений на входные параметры заготовки и выходные параметры детали.

Определение очередности выполнения переходов или операций позволяет формировать отдельные операции из переходов, а также технологический маршрут в целом. Формализованно схему принятия решения можно представить в виде множества, в котором определены типы отношений и эти отношения отображены в виде дерева (табл. 3). Вершины дерева соответствуют точкам принятия решения, а ребра – решаемым задачам.

Структура дерева определяет возможные маршруты обработки, и независимо от формы запроса ответ на него будет определяться однозначно, если в нем содержатся необходимые исходные данные. Наличие информации о количестве и характере задач на каждом уровне дерева позволяет сформулировать общие требования к алгоритму принятия комплекса решений.

Реализация рассмотренной структуры принятия комплекса технологических решений позволяет построить схему взаимосвязи совокупности деревьев (задачи и решений), которая представлена в таблице частично. В качестве примера представлена схема решения задач первого уровня. Затем решают задачи бо-

3. Фрагмент детализации процесса формирования алгоритма решения комплекса технологических задач

Уровень	Наименование	Схема реализации	Обозначение
1	Структурная детализация алгоритма технологических решений		1 – выбор способа; 2 – по элементам; 3 – комплексно; 4...6 – оборудование (универсальное, специальное, автоматизированное и др.)
2	Структура ЭВМ		1 – технологические характеристики ЭВМ
3	Выбор технологического оснащения		1 – выбор штампа; 2 – штамп простого действия; 3 – штамп комбинированого действия; 4 – совмещенный штамп; 5 – последовательный штамп

лее низкого уровня – задачи по определению непротиворечивости и полноты информации, сокращению трудоемкости формирования массивов выходной информации.

Наличие обобщенного маршрута операций может создать ситуация неопределенности при решении технологических задач. Для преодоления такой неопределенности возможны два пути. Первый – принятие решения по аналогии из прошлого опыта. Второй – принятие решения по этапам, если нет возможности принять решение как в первом случае. Тогда расчленяют процесс на такие стадии, на которых возможно принятие решения на первой стадии при заданных исходных данных; на второй и последующих стадиях решение принимают с учетом исходных данных и результата решения на предыдущей стадии. Процесс продолжается до получения заданной точности.

Оптимальное технологическое решение может быть лучшим среди других по технологическому или экономическому признаку. С экономической точки зрения лучшее решение должно обеспечивать минимальную себестоимость. Такое решение традиционно получают итерационным путем.

Этот путь является трудоемким. Более рациональным является путь попарного сравнения вариантов, полученных при автоматизированном проектировании. При возможности из небольшого числа вариантов выявляют наиболее рациональные и выводят на печать в целях выбора оптимального из них специалистом-технологом.

Пример формирования алгоритма комплекса технологических решений при вытяжке.

Алгоритм выбора исходной заготовки определения ее размеров, расчета числа переходов и геометрических размеров при операциях вытяжки:

1) ввод исходных данных;

2) обрезка припуска необходима, если нет, то переход к п. 6;

3) детали без фланца, если нет, то переход к п. 5;

4) назначение припуска на обрезку детали без фланца и переход к п. 6;

5) назначение припуска на обрезку детали с фланцем;

6) расчет площади детали и диаметра заготовки;

7) выбор вида исходной заготовки и назначение оборудования для резки;

7.1) определение коэффициента использования материала (КИМ) для каждого вида заготовки (ВЗ) (лист, лента, рулон, полоса и др.) и выявление ВЗ, обеспечивающего наибольший КИМ;

7.2) если ВЗ = 1, то назначить операцию с кодом 112 (см. табл. 2); далее переход к п. 7.6;

7.3) если ВЗ = 2 и ширина ленты равна ширине или длине штампуемой заготовки, то заготовительная операция отсутствует; переход к п. 7.6;

7.4) если ВЗ = 3 и ширина рулона не равна ширине или длине штампуемой заготовки, то назначить операцию с кодом 114 (см. табл. 2); переход к п. 7.6;

7.5) если ВЗ = 5 или $\neq \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{Bmatrix}$, то назначить операцию с кодом 113 (см. табл. 2);

7.6) назначить оборудование (см. табл. 1) и печатать информацию в виде таблицы: номер операции, код и наименование операции, содержание операции (перехода), код, наименование и модель оборудования;

8) расчет допустимых значений коэффициентов вытяжки K_i;

9) $i = 1$;

10) расчет допустимого диаметра полуфабриката (детали) для первой вытяжки;

11) деталь без фланца, если нет, то переход к п. 22;

12) вытяжка за один переход возможна, если нет, то переход к п. 18;

13) обрезка припуска необходима, если нет, то переход к п. 16;

14) расчет первого перехода вытяжки детали с фланцем;

15) обрезка (и калибровка); переход к п. 17;

16) расчет первого перехода вытяжки без фланца;

17) выход из алгоритма;

18) $i = i + 1$;

19) расчет допустимого диаметра детали для i-го перехода;

20) вытяжка за i переходов возможна, если нет, то переход к п. 22;

21) обрезка припуска необходима, если нет, то переход к п. 24;

22) расчет (i – 1)-го перехода вытяжки детали без фланца и переход к п. 18;

23) расчет (i – 1)-го перехода вытяжки детали без фланца;

24) расчет i-го перехода вытяжки детали с фланцем с учетом припуска на обрезку;

25) назначение (i + 1)-го перехода; обрезка припуска и калибровка;

26) расчет (i – 1)-го перехода вытяжки детали без фланца;

27) назначение i-го перехода вытяжки детали без фланца;

28) выход из алгоритма.

С помощью САПР холодной листовой штамповки решают следующие задачи (рис. 5):

– анализ номенклатуры деталей; комплектование технологических групп деталей; определение состава технологического оборудования, оснастки; укрупненный расчет трудоемкости операций;

– выбор способа штамповки, схемы штамповки; расчет размеров заготовок; выбор варианта раскроя полосы (ленты);

– проектирование маршрутного технологического процесса с назначением заготовительных, штампо-

Рис. 5. Проектные задачи САПР холодноштамповочного производства:
САПИР – система автоматизированного проектирования информационных решений; ЛШ – листовая штамповка; ТП – технологический процесс; Ш – штамп

вочных, вспомогательных операций и операций с учетом комплектования групп деталей;

– проектирование операционных технологических процессов разделительных и формообразующих операций на штампы простого, последовательного и совмещенного действия, универсально-наладочные и универсально-сборные штампы и специализированное оборудование; расчеты технологических параметров использованных операций;

– нормирование расхода материалов;

– нормирование трудовых затрат, штучного и подготовительно-заключительного времени;

– разработка технического задания на проектирование штампов простого, совмещенного, последовательного действия, на сменные комплекты инструмента и универсально-наладочные штампы;

– проектирование штампов с вычерчиванием всех нестандартных элементов конструкции штампа, сборочного чертежа, спецификации, технических требований и др.

Некоторые примеры использования САПР и ее элементов в подготовке листоштамповочного производства приведены ниже.

Решение задачи об оптимальном раскрое исходной заготовки (рулона, листа, полосы) в общем случае сводится к тому, чтобы при отрезке исходной заготовки не было немерного остатка как по ширине, так и по длине, и общий коэффициент использования материала был наибольшим. В работах Ф.В. Бабаева приведены математические модели для автоматизированного расчета раскроя (прямоугольных, фасонных и других видов заготовок).

В современных гибких производственных системах технология, разработанная с помощью САПР (обычно для исполнения на унифицированном технологическом оснащении, установленном на прессовом оборудовании с числовым программным управлением), передается непосредственно с ЭВМ на пресс, минуя промежуточные звенья (технологические маршрутные и операционные карты и др.).

Автоматизация проектирования штампов

Методологические основы автоматизированного проектирования штампов. В технологической подготовке производства новых изделий длительность и трудоемкость проектирования технологической оснастки составляют соответственно 90 и 80 %. Существующие САПР штампов (САПРШ) созданы на основе двух методологических подходов: 1) модель конструкции штампа представлена в виде многоуровневой иерархической структуры, в которой конструктивным элементом является часть конструкции (детали), которые в процессе проектирования нецелесообразно расчленять на более мелкие составляющие части; 2) модель конструкции представлена в виде многоуровневой иерархической структуры, в которой элементы конструкции выделены по их функциональному назначению. Этот подход позволяет однозначно определять структуру проектируемых штампов.

САПРШ в этом случае – это совокупность подсистем, каждая из которых обеспечивает проектирование определенной части конструкции. Структура системы при этом подходе аналогична структуре штампа. В настоящее время первый подход разработан достаточно

подробно; второй пока менее распространен, так как его начали позже разрабатывать, однако использование второго подхода более удобно для пользователя и обеспечивает легкую корректировку и совершенствование системы проектирования.

При создании САПРШ решают следующие задачи:

1) изучение особенностей производства и номенклатуры штампуемых деталей;

2) изучение конструкции проектируемых на предприятии штампов;

3) изучение оборудования для изготовления и эксплуатации штампов;

4) определение состава входной информации для проектирования штампа, разработка новой или выбор одной из существующих систем подготовки входной информации;

5) разработка моделей конструкции и создание системы описания моделей конструкции штампа и его элементов;

6) определение задач проектирования, решаемых каждым модулем системы, и создание методик автоматизированного решения задач;

7) разработка алгоритмов и программ решения задач каждым программным модулем;

8) автономная отладка программных модулей;

9) разработка программного комплекса графического обеспечения системы проектирования;

10) комплексная отладка отдельных подсистем и всей системы;

11) опытная эксплуатация системы;

12) внесение изменений по результатам опытной эксплуатации;

13) сдача системы в эксплуатацию.

Состав и структурное построение САПРШ. САПРШ – это сложная система, эффективное функционирование которой можно обеспечить при соблюдении следующих принципов: системного единства, развития, комплексности, информационного единства, совместимости, инвариантности.

Основные структурные звенья САПРШ – подсистемы. Подсистемы подразделяют на инвариантные и объектные. Объектные подсистемы – это подсистемы, каждая из которых проектирует определенную функциональную часть конструкции штампа. В состав САПРШ входят в общем случае следующие объектные подсистемы проектирования: рабочих частей, системы выталкивания, системы съема, системы ориентации и фиксации заготовки, блока, ограждения в зависимости от принятой типовой конструкции штампа.

Инвариантными подсистемами САПРШ, выполняющими функции управления и обработки информации, являются: подготовка, контроль, ввод исходных данных, управление процессом проектирования, вывод результатов, управление базой данных.

Структурное единство каждой подсистемы САПР обеспечивается связями между компонентами различных средств обеспечения (методического, программного, информационного и др.), а структурное объединение подсистем в систему – связями между подсистемами. У всех подсистем должны быть предусмотрены единое лингвистическое обеспечение, совместимость программного обеспечения.

Информационное обеспечение САПРШ составляет входная, базовая и выходная информация. Входной является переменная часть информации, необходимая для проектирования конкретного штампа, содержащая сведения о детали и об объеме ее производства. Состав, характер и объем информации должен быть исчерпывающим и минимальным и обычно содержит следующие данные о детали: метод получения (вырубка, гибка, вытяжка и др.), габаритные размеры, марку, состояние и характеристики материала, геометрическую форму (плоская, П-образная, Г-образная и т.д.), общее число размеров на чертеже, число отверстий и пазов, объем выпуска. Такой объем информации определяет тип и конструкцию проектируемого штампа, размеры и материалы его деталей, применяемое оборудование и тип производства.

Входная информация формируется на основе чертежа детали, объема выпуска и подразделяется на следующие группы: общего характера, технологического характера, данных о размерах, допусках и о форме детали. Информация общего характера – это номер детали, номер штампа, тип штампа, объем выпуска, тип блока и т.п.; технологическая информация – материал, толщина материала, вид и параметры раскроя и т.п.

Базовая информация – это условно-постоянная информация, необходимая и достаточная для проектирования определенного класса штампов. Базовая информация содержит сведения об объекте проектирования, оборудовании, материалах деталей штампов, стандартизованных элементах конструкции, бланках-чертежах, типовых изображениях и других элементах, которые вместе составляют библиотеку этих данных.

Основой автоматизированного проектирования штампов является максимальное использование типовых инженерных и конструктивных решений. Примерами типовых стандартных решений в конструкции штампа являются: толкатели, пружины, упоры, винты, штифты (рис. 6), детали штампа и буфера, блоки и другие элементы конструкции. По коду детали или элемента конструкции в процессе проектирования конкретного штампа выбирают соответствующие ти-

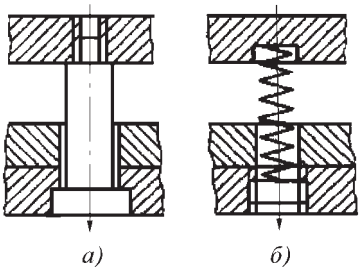


Рис. 6. Стандартизованные элементы штампа: *а* – толкатель; *б* – прижим выталкивателя

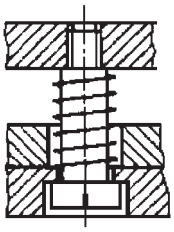


Рис. 7. Сборочный чертеж стандартного элемента конструкции

пы, размеры и параметры. Каждый стандартизированный элемент конструкции представляют в виде чертежа согласно требованиям ЕСКД с учетом автоматизации проектирования.

На сборочном чертеже стандартизованный элемент изображают в виде конструктивно законченной сборочной единицы (рис. 7) совместно с несущими деталями штампа и представляют для нее спецификацию. На сборочном чертеже и на деталях устанавливают направление координат, также проставляют габаритные и присоединительные размеры в буквенном виде, числовые значения размеров указывают в таблице для каждого типоразмера, для расчетных размеров приводят соответствующую формулу.

Типовые размеры штампа в библиотеке системы находятся в виде базовой постоянной информации бланка-чертежа и типового изображения; бланк-чертеж типовой детали штампа содержит графическое изображение по правилам ЕСКД и таблицу с буквенными обозначениями размеров, числовые значения которых вписывают при проектировании штампа; типовое изображение содержит сведения об отдельных элементах чертежей штампов, обладающих постоянными геометрическими характеристиками: конфигурацией, типами линий, порядком чередования линий и т.д. Типовое изображение – это проекция детали или элемента конструкции: отдельные символы, рамка, угловой штамп и т.д.

Каталог информации об оборудовании состоит из следующих данных: модель, параметры рабочей зоны, номинальная сила, присоединительные размеры и т.п.

Библиотека справочных данных – это совокупность констант конструкторского и технологического характера, представленная в виде массивов – таблиц.

Выходная информация – это часть переменной информации, необходимая и достаточная для описания конструкции спроектированного штампа и получения полного комплекта рабочей документации. Комплект рабочей документации на спроектированный штамп состоит из сборочного чертежа, комплекта рабочих чертежей его деталей, спецификации, таблицы размеров и других характеристик.

При получении сборочного чертежа выбирают толщину основных линий, наносят номера позиций и устраняют пересечение выносных линий, определяют число проекций, масштаб и формат чертежа, заполняют основную надпись.

Форма представления выходной информации на детали штампа зависит от сведений, известных о них до начала проектирования: для стандартизованных деталей в спецификации указывают их наименование, ГОСТ и количество, но их не вычерчивают. Для типовых деталей известна до начала проектирования форма и поэтому ее не вычерчивают, а используют бланк-чертежи, на которых в таблицах распечатывают данные о размерах, затем указывают индекс штампа, код детали и номер позиции в спецификации штампа, далее эти данные конструктор вручную переносит на бланк-чертеж. Для специальных деталей форму и размеры полностью или частично определяют в процессе проектирования.

Алгоритм получения чертежа детали: формирование кода детали, распечатка таблиц конструктивных размеров, определение структуры чертежа, формата и масштаба, формирование кода детали, распечатка таблиц конструктивных размеров, определение структуры чертежа, формата и масштаба, формирование описания чертежа детали и вывод описания на машинный носитель для вычерчивания чертежа.

Спецификация в соответствии с ЕСКД содержит: номера позиции деталей, обозначения и их наименование, число в конструкции штампа, признак принадлежности к стандартизованным деталям.

Выходная информация о типе выбранного оборудования содержит сведения о модели оборудования и ее основных параметрах.

Принципы построения САПР штампов

Принципы, заложенные в САПР в процессе проектирования, определяют ее функциональные возможности. Эти принципы определяются следующими параметрами.

Степень возможной формализации определяет два пути конструирования: автоматическое и полуавтоматическое. В первом случае процесс конструирования протекает без участия человека, а процесс дальнейшего развития системы определяется жестко соответствующей программой. Во втором случае конструирование протекает в диалоговом режиме человек – ЭВМ.

Ограничение количества параметров, обрабатываемых системой. Существует большое количество конструкций штампов, типоразмеров узлов и деталей и условий их применяемости, материалов штампуемых деталей, описания изображения типовых элементов, образующих базу данных, с которой взаимодействуют программы проектирования штампов. Для ускорения процесса проектирования его ведут по типовым представителям, которых выбирают с помощью анализа информации, содержащейся в задании на проектирование штампа. В этом случае порядок проектирования сводится к выбору типового представителя из базового набора, вычисления значения параметров унифицированных и стандартных элементов конструкций, компоновки стандартных, унифицированных и оригинальных элементов, выполнения при необходимости прочностных расчетов, расчета рабочих размеров формообразующих деталей, выбора мате-

риала детали, технических условий ее изготовления, формирования цифровой модели деталей. А для штампа в целом определяют параметры пространственного положения деталей штампа, выбор оборудования, формирование спецификации деталей и узлов.

Блочно-модульная структура проектирующей программы определяется иерархической структурой конструкции штампа. Это позволяет представить всю конструкцию из большого количества стандартных и типовых элементов, для которых можно создавать типовое проектное решение. Использование таких решений позволяет существенно сократить затраты на создание САПР. В связи с этим весьма полезным является создание или использование ранее разработанного инвариантного программного комплекса – пакета прикладных программ, который может быть методологической и программной основой для создания САПР на различных предприятиях. Таким пакетом прикладных программ является разработанный фирмой "Топ-системы" института Конструкторско-технологической информатики Российской Академии наук (ИКТИ РАН) система автоматизированного проектирования T-Flex/Штампы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Евдокимов С.А., Краснов А.А., Пичугин В.И.** Автоматизация проектирования конструкций штампов для листовой штамповки // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2005. № 5. С. 34–42.
2. **Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Павлов В.В., Рыбаков А.В.** Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии. М.: Наука, 2003. 292 с.
3. **Краснов А.А., Пичугин В.И., Чередниченко Ю.В.** Проектирование штампов листовой штамповки при работе в САПР // Автоматизация проектирования. 1998. № 3. С. 13–17.
4. **Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н.** Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 480 с.
5. **Рыбаков А.В., Евдокимов С.А., Краснов А.А.** Создание систем автоматизации поддержки инженерных решений // Автоматизация проектирования. 1997. № 5. С. 44–51.

Виктор Григорьевич Ковалёв, д-р техн. наук;
Анатолий Викторович Рыбаков, канд. техн. наук

Памяти Анатолия Васильевича Сафонова (7.10.1939 – 5.03.2007)

5 марта 2007 г. после тяжелой продолжительной болезни скончался проф. кафедры "Технологии обработки давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана Анатолий Васильевич Сафонов, д-р техн. наук, акад. Академии проблем качества РФ.

А.В. Сафонов являлся известным ученым, разработавшим новое научное направление и методы расчета винтовых специализированных прессов для штамповки в закрытых штампах, винтовых прессов с муфтовым приводом и кривошипных прессов с электромеханическими системами управления. Им разработаны основы поискового конструирования новых кузнечно-штамповочных машин с использованием динамических и математических моделей кузнечно-штамповочных машин, методики моделирования работы специализированных прессов в условиях динамического нагружения.

В 1976 г. им успешно защищена кандидатская диссертация, а в 1989 г. – докторская диссертация.

За создание нового оборудования А.В. Сафонов удостоен золотой и серебряных медалей ВДНХ СССР, награжден знаками "Изобретатель СССР" и "Отличник изобретательства и рационализации". А.В. Сафонов на протяжении многих лет проводил совместно с ЗАО "Тяжмехпресс" (г. Воронеж) и ОАО "Тяжпрессмаш" (г. Рязань) работы по созданию кривошипных и винтовых прессов с новыми системами управления.

Плодотворна научно-педагогическая деятельность А.В. Сафонова. При его участии в качестве научного руководителя и консультанта были защищены 2 докторских и 9 кандидатских диссертаций. Он опубликовал более 200 научных и методических трудов и имел около 200 патентов и авторских свидетельств РФ и зарубежных стран.

А.В. Сафонов являлся членом диссертационного Совета при МГТУ им. Н.Э. Баумана, членом редакционной коллегии журнала "Кузнечно-штамповочное производство", членом редакционной коллегии журнала "Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение". А.В. Сафонов был автором журнала "Заготовительные производства в машиностроении".

В 2004 г. А.В. Сафонову была присуждена Государственная премия РФ за работу "Научные основы проектирования и создание гаммы тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов, технологии штамповки и автоматических линий для изготовления крупных поковок".

Анатолий Васильевич был не только превосходным ученым, педагогом, но и замечательным человеком. Коллеги и ученики профессора А.В. Сафонова глубоко скорбят о его безвременной кончине.

Память об Анатолии Васильевиче Сафонове навсегда сохранится в наших сердцах!

Ректорат МГТУ им. Н.Э. Баумана,
научно-учебный комплекс "Машиностроительные технологии",
коллектив кафедры МТ-6, редакция и редакционный совет
журнала "Заготовительные производства в машиностроении"

УДК 621.771

В.П. Шеногин, И.Б. Покрас, Н.В. Тепин, В.А. Храбров, М.В. Чучалов
(Ижевский государственный технический университет)

Исследование области внеконтактных деформаций при производстве гнутых гофрированных профилей

Приведен способ расчета размеров и формы области внеконтактных деформаций при профилировании гнутых гофрированных профилей. Даны рекомендации по способу подачи полосы в профилегибочный стан.

The way of calculation of the sizes and forms of area deformations at profiling bending of the goffered structures is resulted. Recommendations on a way of the strip feed in profile bending mill are given.

Большое влияние на качество профилей оказывает поведение профилируемой заготовки в пространстве между клетями стана. Особенно это важно для профилей типа гофрированных листов.

Часто при начале формовки гофров на таких профилях область плавного перехода или далее область внеконтактной деформации приобретает четко обозначенную замкнутую жесткую границу, отделяющую упругую часть от пластической, по которой металл подвергся пластической деформации (рис. 1).

При профилировании такая область перестает сохранять свои размеры и форму и постепенно уменьшается (рис. 2). После достижения некоторой критической длины область внеконтактных деформаций скачком увеличивается до первоначальных размеров и процесс повторяется вновь.

В результате данного явления по дну профиля образуются складки и вмятины, портится защитное и декоративное покрытие.

В данной работе предложена модель, позволяющая определить форму и размеры области внеконтактных деформаций, даны рекомендации по предупреждению описанных выше дефектов.

Для решения поставленной задачи применен энергетический метод, основанный на сравнении работы внешних и внутренних сил, возникающих в полосе в результате деформирования.

Начало координат примем по середине ширины полосы в плоскости осей валов деформирующей клети (рис. 3).

Чтобы найти работу внутренних сил, воспользуемся методом, описанным А.С. Вольмиром в книге "Устойчивость упругих систем". М.: Физматгиз, 1963.

Рис. 1. Формирование первого гофра (профиль Н20)

Профиль гофра имеет форму, задаваемую калибром, только в непосредственной близости от плоскости осей валков клети. По мере удаления от нее в направлении, противоположном направлению профилирования, высота профиля и угол подгибки боковых стенок гофра уменьшаются. Так как бóльшая часть полосы лежит в плоскости *XOY*, рассмотрим только зону внеконтактной деформации ($x \in [-b, b]$, $y \in [0, l]$). Приближенно опишем ее форму следующим выражением:

$$\overline{\omega}(x, y) = -H \cos\frac{\pi x}{2b} \cos\frac{\pi y}{2l},$$

где H – высота гофра; b – ширина гофра, определяемая из размеров калибра; l – длина области внеконтактных деформаций, неизвестная величина.

При образовании гофра металл втягивается в очаг деформации. Зададим перемещение точек профиля вдоль оси *OX*:

$$u(x, y) = B\left(1 - \cos\frac{\pi x}{2b}\right)\cos\frac{\pi y}{2l},$$

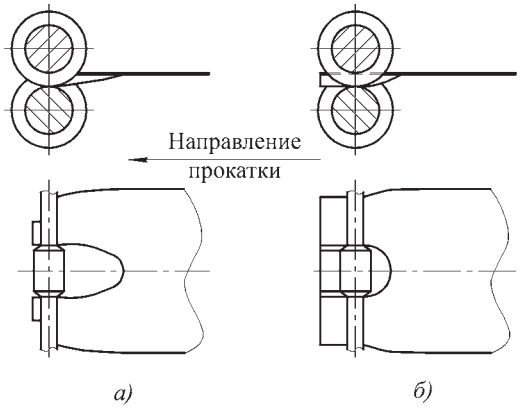


Рис. 2. Уменьшение длины области внеконтактных деформаций при движении полосы:
а – начальная длина области; *б* – длина области после уменьшения

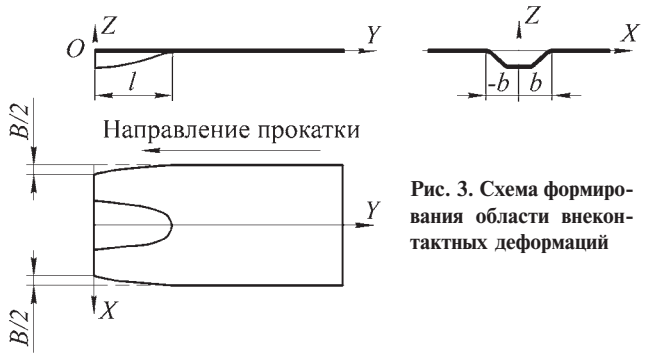


Рис. 3. Схема формирования области внеконтактных деформаций

где B – уменьшение ширины профилируемой полосы в плоскости осей валков деформирующей клети в результате формоизменения.

Изменение длины профилируемой полосы $v(x, y)$ в пространстве между клетями стана будем считать пренебрежимо малым:

$$v(x, y) = 0.$$

Тогда работа внутренних сил полосы может быть представлена выражением

$$A_{\text{внут}} = \frac{Gh}{1-\mu}\int_0^l\int_{-b}^b\left[\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 2\mu\varepsilon_x^2\varepsilon_y^2 + \frac{1}{2}(1-\mu)\gamma_{xy}^2\right]dxdy, \qquad (1)$$

где

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\overline{\omega}}{\partial x}\right)^2;$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\overline{\omega}}{\partial y}\right)^2;$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial\overline{\omega}}{\partial x}\frac{\partial\overline{\omega}}{\partial y};$$

G – модуль Юнга при сдвиге; h – толщина полосы.

Подставив в формулу (1) выражения $\overline{\omega}(x, y)$, $u(x, y)$ и $v(x, y)$, получим зависимость работы внутренних сил полосы от длины области внеконтактных деформаций $A_{\text{внут}}(l)$.

Работы внешних сил найдем для случая профилирования профиля с трапецеидальными гофрами.

При формировании гофра полоса претерпевает изгиб в четырех местах. Угол, на который происходит изгиб во всех четырех случаях, равен углу подгибки α в данной клети. Предельный изгибающий момент равен

$$M_{\text{пл}} = \frac{1}{4}\sigma h^2 l,$$

Рис. 4. Область внеконтактных деформаций

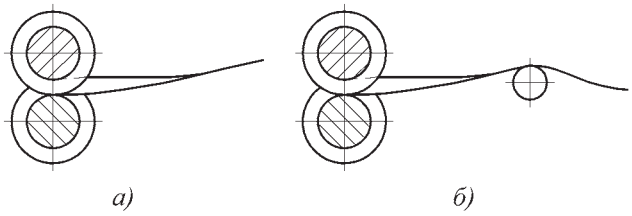


Рис. 5. Подача полосы в клеть

где σ – напряжение текучести материала полосы; h – толщина полосы; l – длина зоны изгиба (равна ширине области внеконтактных деформаций).

Угол подгибки боковых стенок гофра по мере удаления от плоскости осей валков клети уменьшается. Запишем его в следующем виде:

$$\alpha(y) = \alpha_0\cos\frac{\pi y}{2l},$$

где α_0 – угол подгибки в плоскости осей валков клети; l – длина области внеконтактных деформаций.

Работа внешних сил деформации полосы может быть выражена формулой

$$A_{\text{внеш}}(l) = 4\int_0^l M_{\text{пл}}\alpha(y)dy = \frac{2}{\pi}\sigma h^2\alpha_0 l^2.$$

Приравняв работы внешних и внутренних сил, получим уравнение длины зоны внеконтактной деформации. Решив его, получим значение l, определяющее длину этой области. Подставив найденное l в выражение для $\overline{\omega}(x, y)$, получим форму области внеконтактных деформаций.

Был выполнен расчет размеров области внеконтактных деформаций для профиля Н20 со следующими параметрами: ширина $2b$ = 138 мм; высота гофра A = 8 мм; угол подгибки α_0 = = 19° ≈ 0,33 рад; толщина полосы h = 0,55 мм; смещение в плоскости осей валков клети B = 1,8 мм.

Вычисления проводили с использованием программного продукта Mathcad 11. Найдена длина области внеконтактных деформаций l = 169,9 мм. Данное значение отличается от наблюдаемого на полосе на 7,8 %, что показывает достаточно высокую достоверность предложенной модели.

При настройке станов для производства профилей Н10, Н20, Н44 и Н60 было отмечено, что если при задаче полосы ее задний конец расположен ниже основной линии, возникает описанный в начале статьи дефект; если же задний конец полосы выше основной линии, то область внеконтактных деформаций становится незамкнутой и расходится к краям полосы (рис. 4).

Во втором случае область внеконтактных деформаций принимает стабильную форму и размеры, а поверхность профиля не имеет дефектов.

Поэтому целесообразным является подавать полосу в стан таким образом, чтобы ее задний конец был выше основной линии профилирования (рис. 5, *а*). Если это трудно осуществимо, то следует применять роликовую арматуру, а именно устанавливать под полосой поддерживающий ролик (рис. 5, *б*). Ролик поднимает полосу в межклетевом пространстве стана, приводя к тому, что ее задний конец становится выше основной линии профилирования.

Владимир Петрович Шеногин, д-р техн. наук;
Илья Борисович Покрас, д-р техн. наук;
Николай Васильевич Тепин, ст. преподаватель;
Василий Анатольевич Храбров, инженер-программист;
Михаил Владимирович Чучалов, инженер

Н.С. Арсентьева, Л.М. Железняк, А.И. Снигирев, Е.В. Кузьмина, О.Л. Глухова
(ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов",
Уральский государственный технический университет – УПИ, Екатеринбург)

Освоение производства бронзовых полуфабрикатов широкого сортамента для машиностроения на ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов"

Приведены результаты реализации на ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов" программы по организации промышленного выпуска впервые освоенных, новых видов изделий высокого качественного уровня из следующих бронз: оловянно-фосфористой, хромовой и хромоциркониевой, безоловянных труднодеформируемых.

The article brings the results of realization on JSC "Kamensk-Uralsky non-ferrous metal working plant" the program by organization of industrial manufacture of the first time developed new high quality goods of the following bronzes: tin-phosphorus, chromium and chrome-zirconium, tin-free hardly-deformed.

ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов" ("КУЗОЦМ") – ведущее предприятие цветметобработки РФ, традиционно ориентированное на производство сплошного мелкого сорта из тяжелых цветных металлов (ТЦМ) и их сплавов: круглых, квадратных и шестигранных прутков, полос прямоугольного и клиновидного сечения, разнообразных фасонных профилей, проволоки, порошков и пудр – общим числом более 15 тыс. позиций из 140 сплавов на основе меди, никеля, цинка.

Продукция ОАО "КУЗОЦМ" широко представлена на рынке проката в виде проволоки и прутков из различных бронз конструкционного (с добавками алюминия, кремния, марганца, олова, а также комплексно легированных) и электротехнического (кадмиевой, магниевой, хромовой, хромоциркониевой и более сложного состава) назначения, успешно используемых предприятиями машиностроительных отраслей России, ближнего и дальнего зарубежья.

Серьезные изменения в экономической сфере страны за последние 12–15 лет существенно повлияли на деловые связи не только с фирмами – традиционными партнерами завода, – но и с новыми заказчиками – потребителями полуфабрикатов из сплавов на основе ТЦМ: усилились требования к характеристикам качества продукции; появилась потребность в выпуске изделий из новых для завода сплавов (следовательно, значительно расширился типоразмерный и марочный сортамент производимых полуфабрикатов); потребовалось решать задачу удовлетворения технических требований (ТТ) зарубежных стандартов, существенно отличающихся от ТТ стандартов РФ по уровню эксплутационных свойств, состоянию поставки, требованиям к внешнему виду.

Согласно заказам деловых партнеров завода (отечественных, из стран СНГ и дальнего зарубежья) в ОАО "КУЗОЦМ" в соответствии с заключенными контрактами организуется проведение НИР по разнообразной тематике. Их результаты являются основой проводимых организационно-технических мероприятий, цель которых – совершенствование основного и вспомогательного оборудования и деформирующего инструмента, а также разработка технологического регламента, гарантированно обеспечивающего выпуск изделий, характеристики которых отличаются от установленных ГОСТами, в частности, это относится к прутам и проволоке из указанных бронз.

Недостаточность литературных данных об особенностях технологии при горячей деформации оловянно-фосфористых бронз серьезно затруднила нахождение оптимальных параметров прессования на горизонтальном гидравлическом прессе (ГГП) прутковых заготовок под последующее волочение из высокооловянистой бронзы БрОФ7–0,2. Причинами низкой пластичности при горячей обработке давлением слитков из этого сплава являются развитая дендритная структура, пористость и склонность к ликвации, поэтому для повышения технологической пластичности сплава на отечественных предприятиях цветметобработки используют следующие две схемы обработки [1]:

– применение двукратного прессования, при котором из крупного слитка диаметром 250...300 мм в горячем состоянии прессуют на ГГП промежуточную заготовку диаметром 100...120 мм (ее принято называть "болтом"), при прессовании дробится дендритная структура, устраняются пористость и рыхлость слитка; далее болты режут на мерные заготовки, подвергаемые затем второму горячему прессованию в целях получения прутковых заготовок для завершающей части технологического цикла – волочения;

– использование гомогенизирующего отжига для ликвидации химической микронеоднородности сплава и модифицирования его структуры.

Учитывая существенные недостатки первой схемы, связанные со значительными энерго- и трудозатратами, а также с низким выходом годного (на уровне 48...50 %), на заводе выбрали вторую схему обработки. Основные этапы ее реализации следующие:

– от наполнительного литья в изложницы с присущим ему хаотичным распределением рыхлот в слитке отказались

и перешли на литье полунепрерывным методом, позволившим получить слитки высокого качества; для этого применили усовершенствованную конструкцию кристаллизатора, защищенную патентом РФ;

– гомогенизирующий отжиг полученных слитков по режимам, соответствующим известным параметрам технологического регламента [1], провели в камерной электропечи с выдвижным подом;

– нагретые до температуры, соответствующей интервалу наивысшей пластичности сплава, литые порезанные заготовки диаметром 190 мм прессовали вгорячую на прутковые заготовки на ГГП силой 35 МН с отделением рубашки;

– завершающую технологический цикл операцию волочения проводили на линейных цепных станах силой 200 и 300 кН и получали прутки согласно требованиям ГОСТ 10025–78 с различной степенью упрочнения трех состояний: полутвердые (НВ ≥ 120; $\sigma_в$ ≥ 392 МПа; δ ≥ 18 %), твердые (НВ ≥ 140, $\sigma_в$ ≥ 470 МПа; δ ≥ 12 %), особотвердые (НВ ≥ ≥ 150; $\sigma_в$ ≥ 549 МПа, δ ≥ 6 %).

Хромовые и хромоциркониевые бронзы, составляющие в цветметобработке России существенную часть низколегированных сплавов на медной основе [2], вследствие оптимального сочетания высоких электро- и теплотехнических характеристик и прочностных свойств, достигаемых термодеформационной обработкой (ТДО)*, находят широкое применение в качестве электродов и другой оснастки машин электроконтактной сварки, в приборостроении, электронике, теплообменных агрегатах и др. При выполнении очень жестких требований, дополнительно предъявляемых заказчиками к пруткам диаметром 6...63,5 мм из этих бронз, на заводе продуктивно используются следующие три технологические схемы.

Согласно первой схеме для изготовления крупных прутков диаметром 38...63,5 мм заготовки, порезанные из слитков полунепрерывного литья, прессовали на ГГП силой 17 МН с одновременной закалкой в воду, далее прутки старили в электрической печи и после резки на мерные длины подвергали правке в косовалковой прави́льной машине.

Во второй схеме для изготовления прутков диаметром 12...35 мм бунтовые заготовки диаметром до 22 мм и прутковые заготовки диаметром 23...50 мм прессовали на ГГП силой 35 МН. Далее после закалки протягивали до чистовых размеров: бунты – на однократной машине ВСГ 1/720 и автоматической линии "Шумаг" с резкой в меру и правкой, совмещенной с операцией снятия остаточных напряжений; прутки – на линейном цепном стане силой 150 кН; завершающие операции цикла были аналогичны первой схеме.

При использовании известных рекомендаций [3, 4] для изготовления самых малых прутков диаметром 6...10 мм (третья схема) изделия не отвечали ТТ стандарта ASTM, а именно: не обладали надлежащей твердостью, имели повышенную продольную кривизну, не удовлетворяли требованиям к внешнему виду поверхности. Схему существенно усовершенствовали: бунтовые прессованные заготовки после закалки и двухпроходного волочения на машине ВСГ 1/720 со скальпированием между проходами (традиционный вариант) подвергали ТДО по разработанным на основе опытов и запатентованным в РФ режимам старения и чистового волочения, в результате достигли стабильного уровня механических свойств и продольной кривизны прутков, а также высокого качества их поверхности, полностью удовлетворяющих требованиям ASTM.

Электроды для контактной сварки, изготовленные из прутков хромовой бронзы БрХ1, полученных по усовершенствованной технологии и имеющих твердость не менее 75 HRB и электропроводность ρ ≤ 75 % ρ_{Cu}, успешно испытаны на одном из предприятий российского автопрома. Эксплуатационная стойкость полученных электродов в 2 раза выше по сравнению с прежними электродами.

Отдельного внимания заслуживает группа безоловянных труднодеформируемых в горячем и холодном состоянии бронз БрАЖНМц9–4–4–1 по ГОСТ 1628–78 [5]; CW307G по DIN EN12167 (ее российским аналогом является бронза БрАЖН10–4–5) и БрКН1–3 в связи с особенностями требований, предъявляемых к изделиям из них.

При изготовлении круглых горячепрессованных прутков диаметрами 12...132 мм (в холодном состоянии $\sigma_в$ ≥ ≥ 680 МПа) из двух первых указанных бронз необходимо с высокой точностью выдерживать узкий температурный интервал их горячей деформации; этого достигли путем строгого соблюдения температурно-скоростного режима процесса прессования на ГГП силой 35 МН.

Кроме того, важное значение имеет точное соблюдение химического состава сплавов [6] по содержанию основных легирующих компонентов (особенно алюминия) и примесей (свинца), в противном случае на поверхности прессованных заготовок почти неизбежно появление грубых задиров. По этой причине в технологический регламент производства прутков из этих бронз ввели более жесткие по сравнению со стандартными внутризаводские ограничения по химическому составу сплавов и в результате получили продукцию требуемого качества.

При изготовлении горячепрессованных круглых прутков диаметром 90, 110 и 130 мм (ГОСТ 1628–78) и особенно прямоугольного профиля сечением 100×125 мм (ТУ 48-21-354–74 [7]) из бронзы БрКН1–3, вследствие того что прямоугольный профиль в отличие от круглых прутков, поставляемых немерной длины, должен быть кратной мерной длины (равной 650 мм), возникла проблема, связанная с необходимостью удаления искривленных концов профиля, прошедшего правку на вертикальном гидравлическом прессе силой 10 кН.

Обрезка непроправленных концов профиля приводила к нарушению его кратности (что недопустимо по ТУ) или значительному росту потерь металла в виде обрези с одновременным снижением выхода годного. Поскольку в ТУ [7] предел прочности не регламентирован, то после введения в технологический процесс операции закалки прессованного профиля, проводимой непосредственно с температуры деформационного нагрева и соответствующего снижения его прочностных и повышения пластических характеристик, проблема ненадлежащих результатов правки была ликвидирована.

* Известно, что для изделий из дисперсионно-твердеющих сплавов проводится упрочняющая ТДО, включающая в себя закалку (обработку на твердый раствор легирующего компонента в зерне), холодную пластическую деформацию (в данном случае – волочение) и старение (в процессе которого происходит коагуляция дисперсных фаз – упрочнителей).

Важнейшим условием успешного проведения операций обработки давлением всех без исключения сплавов является получение высокого качественного уровня слитков диаметром 190...300 мм рассмотренных в статье различных бронз, а именно отсутствие газовой и усадочной пористости, горячих и холодных межкристаллитных трещин и других металлургических дефектов, вероятность появления которых возрастает с увеличением диаметра слитка. В связи с этим в литейно-плавильном цикле производства постоянно уделяется серьезное внимание режимам плавки сплавов в печах типа ИЛК (индукционная литейная канальная) и последующей их разливки полунепрерывным методом.

С учетом изложенного в литейном цехе завода, как правило, предпринимают комплекс следующих мер:

– гарантированно обеспечивают точность навески при шихтовке и порядок введения в расплав лигатур и металлов соответствующей чистоты, а также раскислителей;

– процессы выплавки и разливки проводят под специально подобранными для существующих условий производства покровными флюсами с заданной толщиной слоя;

– проводят срочный химический анализ литых проб перед началом разливки и в процессе литья, а также анализ темплетов, отрезанных от слитков;

– применяют усовершенствованные конструкции кристаллизаторов, обеспечивающих рассчитанные и проверенные практическим опытом регламентированные параметры расхода, давления, скорости движения и температуры охлаждающей воды;

– строго выдерживают заданные физические параметры плавки и разливки, в частности скоростной режим литья и др.

Высокий и стабильный уровень качественных и количественных показателей продукции из различных бронз обеспечен строгим соблюдением технологического регламента, а также успешно функционирующей на предприятии Системой менеджмента качества, что является надежной гарантией стабильных деловых связей ОАО "КУЗОЦМ" с российскими и иностранными потребителями выпускаемых полуфабрикатов.

Ниже приведены основные результаты технологических решений и соответствующие выводы.

1. По заказам потребителей из РФ, СНГ и стран дальнего зарубежья успешно освоено промышленное производство нетрадиционных для завода, выполненных из новых сплавов, изделий, отвечающих высоким требованиям в части состояния поставки, служебных характеристик, геометрических показателей и внешнего вида, предъявляемым к прутькам из конструкционных и электротехнических бронз.

2. Разработана и осуществлена экономичная технология производства холоднотянутых круглых прутков полутвердого, твердого и особотвердого состояний из высокооловянистой прочной и малопластичной в горячем и холодном состоянии бронзы БрОФ7–0,2; технология включает в себя полунепрерывное литье слитков, их гомогенизацию, горячее прессование заготовок, чистовое волочение до прутков готовых размеров.

3. Реализованы высокоэффективные технологические схемы изготовления прутков широкого диапазона диаметров из электротехнических хромовой и хромоциркониевой бронз; прутки после проведения термодеформационной обработки полностью удовлетворяют требованиям отечественных и зарубежных потребителей по стабильности механических и электротехнических свойств, макрогеометрии и качеству поверхности.

4. Успешно преодолены технологические сложности при производстве безоловянных высоколегированных труднодеформируемых бронз, прутки из которых поставляются по российским и зарубежным стандартам; при их изготовлении введены более жесткие по сравнению со стандартными внутризаводские ограничения по содержанию основных и примесных элементов, а также соблюден строгий технологический регламент их обработки давлением.

5. Для успешного проведения операций ОМД со всеми указанными сплавами, осуществляемых в обрабатывающем цехе завода, достигнут высокий качественный уровень отливаемых слитков – отсутствие газовой и усадочной пористости, горячих и холодных межкристаллитных трещин и других металлургических дефектов; для этого в процессах литейно-плавильного передела самое серьезное внимание уделяется точности навески при шихтовке, режимам плавки сплавов и последующей их разливки полунепрерывным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шевакин Ю.Ф., Грабарник Л.М., Нагайцев А.А.** Прессование тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1987. 246 с.

2. **Николаев А.К., Новиков А.И., Розенберг В.М.** Хромовые бронзы. М.: Металлургия, 1983. 177 с.

3. **Николаев А.К., Розенберг В.М.** Сплавы для электродов контактной сварки. М.: Металлургия, 1978. 96 с.

4. **Розенберг В.М., Николаев А.К.** Цветные металлы. 1972. № 8. С. 65–70.

5. **ГОСТ 1628–78.** Прутки бронзовые. М.: Изд-во стандартов, 1978. 16 с.

6. **ГОСТ 18175–78.** Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. М.: Изд-во стандартов, 1978. 8 с.

7. **ТУ 48-21-354–74.** Профили бронзовые. ОКП 18-4687-5000. Группа В52.

Наталья Сергеевна Арсентьева, гл. инженер
Лев Моисеевич Железняк, канд. техн. наук;
Александр Иванович Снигирев, начальник техотдела;
Елена Васильевна Кузьмина, зам. гл. технолога
Ольга Леонидовна Глухова, студентка

УДК 669.017

О.В. Петраков, А.Н. Поддубный, Е.А. Тупатилов
(Брянский государственный технический университет)

Влияние содержания хрома на структуру белых легированных чугунов в биметаллических отливках

Рассмотрено влияние содержания хрома на образование и структуру его карбидов в белых износостойких чугунах. Приведены рекомендации по определению оптимального химического состава легированных чугунов.

The article considers the influence of the content of chrome on formation and structure of its carbides in wearproof white iron. Recommendations by definition of an optimum chemical compound of alloyed white iron are resulted.

Многие инструменты и механизмы, например прокатные валки, пульповые насосы, работают в сложных эксплуатационных условиях. К ним можно отнести высокое давление, температуру, усталостные процессы и износ. Последние два требуют наличия в изделии противоположных свойств, таких как вязкость, с одной стороны, а с другой – прочность и твердость. Эти требования лучше всего сочетают в себе биметаллические отливки. Рассмотрим свойства и параметры структуры материала, повышающие его износостойкость.

Согласно правилу Шарпи структура износостойкого материала должна состоять из вязкой, прочной матрицы, содержащей твердые частицы [1]. Этому требованию отвечает белый чугун. Металлическая матрица белого чугуна может быть перлитно-карбидной и мартенситно-аустенитно-карбидной. При этом тип металлической матрицы, требуемой для определенного изделия, зависит от конкретных условий изнашивания.

Исследования белого легированного износостойкого чугуна на относительную износостойкость $И_{отн}$ (рис. 1) показали, что мартенсит и первичные карбиды, обладающие высокой твердостью, имеют наилучшие показатели. Эталоном при определении износостойкости были образцы из стали 45 после отпуска.

На твердость указанных структурных составляющих значительное влияние оказывают легирующие элементы (Cr, V, Mo, Mn). Большее распространение в качестве элемента, повышающего износостойкость, получил хром из-за невысокой относительной стоимости и технологической простоты применения.

Почти весь хром, содержащийся в белом чугуне, находится в виде различных карбидов. В зависимости от соотношения углерода и хрома в белом чугуне образуются карбиды типа $(Fe, Cr)_3C$, $(Fe, Cr)_7C_3$, $(Fe, Cr)_{23}C_6$. Твердость карбидов типа Me_7C_3 и $Me_{23}C_6$ достигает 1200...2400 HV. Карбиды типа Fe_3C и $(Fe, Cr)_3C$ имеют твердость 600...800 HV.

Увеличение относительной твердости включений, содержащихся в металлической матрице, приводит к повышению износостойкости. Таким образом, износостойкость белого чугуна напрямую связана с количественным содержанием того или иного типа карбида в структуре. Следовательно, необходимо выявить влияние различных технологических условий на структуру белых легированных чугунов и типы различных карбидов в нем.

Для более подробного изучения морфологии строения легированного хромом белого чугуна и выявления типа карбидов хрома провели серию опытов. Тип карбидов определяли по распределению элементов в структурных составляющих образцов из белого чугуна рентгеноспектральным микроанализом (РСМА) на растровом микроскопе BS-340 фирмы KOVO (Чехия), снабженном аналитической систе-

Рис. 1. Влияние структурных составляющих на относительную износостойкость $И_{отн}$ белого легированного износостойкого чугуна:
1 – аустенит; *2* – первичные карбиды; *3* – вторичные карбиды; *4* – мартенсит

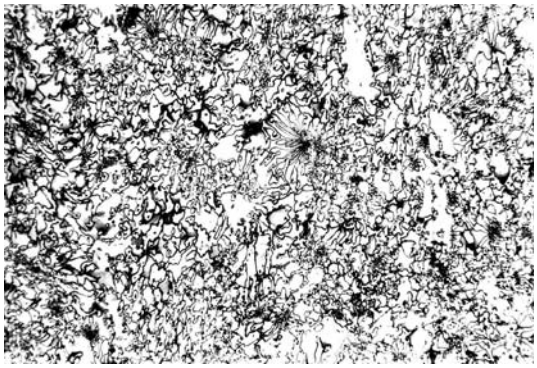


Рис. 2. Микроструктура образца из белого легированного хромом чугуна в литом состоянии, ×200

Рис. 3. Микроструктура образца из белого легированного хромом чугуна после нормализации при 1050…1100 °С и отпуска при 600 °С, ×200

мой QX-2000 фирмы Link analytical (Англия), который позволяет определять содержание элементов в структурных составляющих размером до 1 мкм. Изучение химического состава образцов РСМА осуществляли точечным зондированием. Тип карбида хрома определяли по значению его микротвердости, которую определяли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 0,5 Н.

Образцы изготовляли литьем в кокиль при температуре заливки 1300...1350 °С. Они представляют собой цилиндры диаметром 40 мм и высотой 15 мм из белого износостойкого чугуна, легированного хромом, следующего химического состава, % мас.: 2,6...3,6 С; 0,8...1,2 Si; 4...6 Mn; 8...11 Cr; 2...5 Ni; 0,8...1,2 Mo; 0,5...0,7 Ti; 0,4...0,5 B [2].

Для определения влияния термической обработки на структуру легированного хромом белого чугуна образцы подвергали нормализации при температуре 1050...1100 °С. Нормализация чугунов указанного химического состава, содержащего до 11 % марганца и никеля в сумме, позволяет получить мартенситно-аустенитную металлическую матрицу, обладающую достаточной вязкостью и прочностью. Дальнейшая термическая обработка, заключающаяся в отпуске образцов при 600 и 700 °С, приводит к получению мартенситно-бейнитно-аустенитной металлической матрицы, увеличивая тем самым твердость чугуна, а также к дроблению сетки карбидов ледебурита, что повышает его износостойкость.

Исследовали несколько образцов, один из которых был в литом состоянии (рис. 2), два других – после нормализации и отпуска при различных температурах (рис. 3). Выявили, что в чугунах, содержащих 10 % Cr, присутствуют карбиды Me_3C, входящие в состав колоний ледебурита, первичные карбиды Me_7C_3 и $Me_{23}C_6$, а также вторичные карбиды Me_3C, выделяющиеся из аустенита при его охлаждении. Карбиды типа Me_3C содержат до 15 % Cr, карбиды Me_7C_3 – до 30 % Cr, а $Me_{23}C_6$ – свыше 30 % Cr (таблица).

Никель, содержащийся в чугуне, присутствует в основном в металлической матрице, состоящей из аустенита и продуктов его распада.

Содержание элементов в структурных составляющих легированного хромом белого чугуна

Номер точки	Содержание элементов, % мас.								Твердость HV	Тип карбида, структурная составляющая
	C	Si	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni		
Литое состояние										
1	3,56*	1,2	0,7	<0,26	21,6	4,0	69,9	2,4	1080	$(Fe, Cr)_7C_3$
2		1,1	2,1	<0,28	21,5	6,3	67,4	1,5	1100	$(Fe, Cr)_7C_3$
3		1,3	2,9	<0,28	14,9	7,0	71,7	2,2	1030	$(Fe, Cr)_3C$
4		0,7	1,1	<0,34	29,9	5,1	61,6	1,5	1140	$(Fe, Cr)_7C_3$
5		2,1	0,43	<0,27	3,2	4,8	83,0	6,5	337	Аустенит, сорбит
6		0,6	1,2	<0,38	30,7	6,0	60,2	0,9	1840	$(Fe, Cr)_7C_3$
7		1,1	1,2	<0,28	23,5	5,9	66,0	2,1	1030	$(Fe, Cr)_7C_3$
8		1,9	1,5	0,24	4,8	4,4	82,1	5,4	440	Аустенит
9		3,2	1,9	0,33	1,6	5,7	77,9	7,1	300	Аустенит
Нормализация при 1050…1100 °С, отпуск при 600 °С										
10	3,56*	0,6	0,87	<0,3	34,3	4,8	58,4	1,1	1900	$(Fe, Cr)_{23}C_6$
11		0,5	1,3	<0,3	36,7	5,0	55,4	1,0	2000	$(Fe, Cr)_{23}C_6$
12		0,57	5,4	<0,26	22,0	6,9	64,3	0,8	1430	$(Fe, Cr)_7C_3$

Номер точки	Содержание элементов, % мас.								Твердость HV	Тип карбида, структурная составляющая
	C	Si	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni		
13	3,56*	2,4	0,65	<0,3	2,5	3,8	83,8	6,7	337	Аустенит, сорбит
14		2,3	0,8	0,31	2,7	3,8	84,2	6,2	340	Аустенит
15		1,5	1,2	0,31	9,5	4,6	78,3	4,8	800	$(Fe, Cr)_3C$
16		0,91	2,4	<0,34	12,4	4,7	76,0	3,6	800	$(Fe, Cr)_3C$
Нормализация при 1050...1100 °С, отпуск при 700 °С										
17	4,83	0,7	1,3	<0,30	36,7	4,5	55,5	1,1	2000	$(Fe, Cr)_{23}C_6$
18	1,89	2,4	<0,6	<0,36	3,6	3,6	84,0	6,6	600	Аустенит, сорбит
19	5,87	1,1	0,94	<0,35	29,7	4,8	61,3	2,0	1600	$(Fe, Cr)_7C_3$
20	5,31	1,7	0,9	<0,4	8,0	4,0	80,3	5,1	860	$(Fe, Cr)_3C$

* Среднее содержание углерода в образце.

Содержание молибдена в чугуне не достаточно для образования собственных карбидов. Максимальное содержание молибдена имеют карбиды Me_3C, минимальное – аустенит. Коэффициенты диффузии молибдена в аустените также невелики, поэтому термическая обработка образцов не привела к значительному перераспределению элемента.

Исследования показали, что внутри зерен карбида концентрируется преимущественно марганец, а хром содержится в основном по границам зерен (рис. 4).

Нормализация и отпуск стабилизируют структуру, выравнивая распределение элементов в структурных составляющих (см. таблицу), что положительно сказывается на вязкости и пределе прочности на разрыв. В структуре увеличивается количество карбидов $Me_{23}C_6$, легирующие элементы диффундируют из аустенита в карбид, снижая его твердость, происходит выделение вторичных карбидов. Проведение термической обработки позволяет разбить возможный непрерывный эвтектический карбидный каркас (см. рис. 3) и увеличить дисперсность карбидов (рис. 5). Таким образом, создается структура, наиболее отвечающая правилу Шарпи.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что износостойкость белого чугуна, легированного хромом, может увеличиваться по мере возрастания в структуре общего количества карбидов, например карбидов с высокой микротвердостью, таких как Me_7C_3 и $Me_{23}C_6$, имеющих твердость 1200...2400 HV. Количество карбидов в структуре исследованного чугуна увеличивается с ростом содержания C, Cr, Mo, Ti, Mn. Выявлено, что уже при содержании 10 % Cr в структуре чугуна наблюдаются карбиды Me_7C_3 и $Me_{23}C_6$, значительно повышающие его износостойкость. Однако в источниках [3, 4] приведены данные, что лишь при увеличении содержания хрома выше 15 % в структуре чугуна преобладают карбиды типа Me_7C_3. При этом появление более сложных карбидов хрома начинается при содержании хрома 26...30 %. В то же время карбид $Me_{23}C_6$ незначительно влияет на износостойкость чугуна.

Таким образом, рациональным с точки зрения достижения износостойкости и эксплуатационной стойкости белого легированного чугуна является содержание хрома 10...12 %, так как при этом в его структуре образуется значительное количество твердых карбидов типа Me_7C_3.

Дальнейшее увеличение содержания хрома до 30 % (ЧХ16, ЧХ28 (ГОСТ 7769–82)) способствует образованию карбидов типа $Me_{23}C_6$, однако это не приводит к существенному повышению износостойкости, а также нецелесообраз-

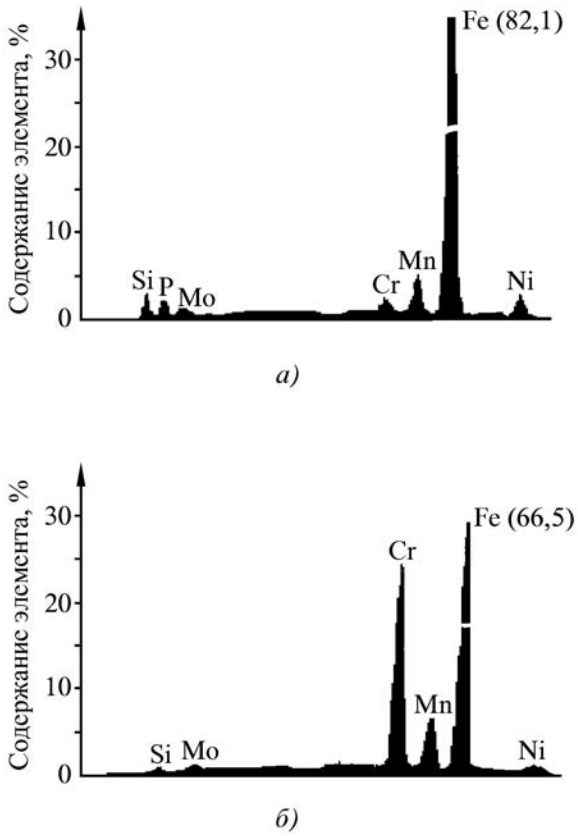


Рис. 4. Содержание легирующих элементов в структуре чугуна:
а – зерно аустенита матрицы (см. таблицу, точка № 5); *б* – зерно карбида (точка № 7)

Рис. 5. Карбидная сетка в структуре образца после нормализации при 1050...1100 °С и отпуска при 700 °С, ×200

но из-за высокой стоимости хрома и незначительного увеличения твердости данного карбида по сравнению с карбидом типа Me_7C_3. Присутствие титана и молибдена, образующих более твердые карбиды (до 3200 HV), нерационально из-за их высокой стоимости и низкой технологичности применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Поддубный А.Н.** Износостойкие отливки из белых легированных чугунов для металлургии и машиностроения / А.Н. Поддубный, Л.М. Романов. Брянск: Приденесье, 1999. 120 с.

2. **Способ** получения литой заготовки из белого износостойкого чугуна для быстроизнашиваемой детали: пат. 2113495 РФ., МПК[7] С 6 С 1/08 / И.К. Кульбовский, А.Н. Поддубный, Н.Ф. Коряков, Ю.В. Игнатенко; патентообладатель И.К. Кульбовский. № 96101380/02; заявл. 23.01.96; опубл. 20.06.98, Бюл. № 17. 6 с.

3. **Поляков Б.Н.** Нагруженность, несущая способность и долговечность прокатного оборудования / Б.Н. Поляков, Ю.И. Няшин, И.Ф. Волегов, А.Ф. Трусов. М.: Металлургия, 1990. 320 с.

Олег Викторович Петраков, инженер;
Анатолий Никифорович Поддубный, д-р техн. наук;
Евгений Анатольевич Тупатилов, канд. техн. наук

УДК 669.15: 620.179

Е.А. Алешина, Ю.Ф. Иванов, А.В. Колубаев, О.В. Сизова, С.В. Коновалов, В.Е. Громов *(Сибирский государственный индустриальный университет, Институт сильноточной электроники СО РАН, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН)*

Особенности формирования структуры и фазового состава поверхности стали Гадфильда при трении

Приведены результаты исследования структуры поверхностного слоя стали Гадфильда, образовавшегося в условиях сухого трения скольжения. Методами рентгеноструктурного анализа, оптической, сканирующей и дифракционной электронной микроскопии исследованы фазовый состав и дефектная субструктура на поверхности трения.

The results of investigation of steel G13 surface layer structure obtained in conditions of dry friction are presented. The phase composition and defect substructure on friction surface have been investigated by methods of X-rays structure analysis, optic, scanning and transmission diffraction electronic microscopy.

В последние годы внимание исследователей в областях физического материаловедения, трения и износа обращено на выявление физической природы формирования структурно-фазовых состояний в приповерхностных слоях стали Гадфильда 110Г13 при трении [1–4]. Это диктуется необходимостью повышения работоспособности изделий в парах трения. Особый интерес представляет анализ процесса трения при малых скоростях и нагрузках, когда тепловой режим на поверхности не приводит к изменению прочностных свойств материала [1–3] и при интенсивной пластической деформации [4] с формированием в тонком слое ультрадисперсной структуры.

Отличительной особенностью стали Гадфильда является до сих пор неисследованная природа упрочнения при трении, вследствие которого микротвердость на поверхности может возрастать в 3–4 раза и достигать 900...1100 HV. Данные, приведенные в работах [4–5], показали, что сталь Гадфильда даже в условиях экстремально больших пластических деформаций и высоких температур, имеющих место при трении и сдвиге под давлением, сохраняет аустенитную структуру. Это объясняют невозможностью протекания

эвтектоидно-перитектоидных превращений из-за кинетических условий термодинамического равновесия, и следовательно, высокая износостойкость данной стали не связана с возникновением в ее структуре мартенсита деформации или карбидных фаз.

Методика исследования. Исследования проводили на установке 2168 УМТ-1 в режиме сухого трения. Схемы испытаний соответствовали сопряжениям "вал–втулка" и "торцевое уплотнение". В качестве образцов использовали втулки внутренним диаметром 31,1 мм, внешним диаметром 39 мм, высотой 10 мм, из стали 110Г13. В первом случае контртелом служил вал диаметром 31,0 мм из стали 42ХМ4Ф, термически обработанной на твердость 56 HRC; во втором случае – диск из закаленной стали У10 (62 HRC), к поверхности которого втулка прижата своим торцом. Кроме втулок испытывали цилиндрические образцы диаметром 15 и 20 мм, высотой 20 мм по схеме "диск–палец". Давление изменяли от 0,8 до 4 МПа, скорость скольжения задавали 0,02; 0,06 и 0,3 м/с. Время испытаний варьировали от 20 мин до 6 ч.

Для оценки влияния трения на структуру поверхностного слоя образцов стали 110Г13 использовали оптическую, сканирующую и электронную микроскопию, а также рентгеноструктурный анализ. Рентгенофазовый анализ после испытаний на трение проводили методом скользящего пучка, который позволял идентифицировать структуру в слое толщиной до 5 мкм.

Результаты исследования. По данным рентгеноструктурного анализа в исходном состоянии сталь Гадфильда имела структуру крупнозернистого аустенита. После триботехнических испытаний уже при давлении 1,5 МПа было обнаружено существование в поверхностном слое оксидной пленки на основе Fe и Mn (рис. 1, *а–г*).

Пленка имеет поликристаллическое строение, размеры кристаллитов 4...12 нм. Слой стали, располагающийся непосредственно под оксидной пленкой и формирующийся в процессе трения, также имеет нанокристаллическое строение. На это указывают характерный крапчатый контраст светлопольного и темнопольного изображений структуры стали (рис. 1, *д*, *е*) и кольцевое строение микродифракционной картины, получаемой с данного подслоя образца (рис. 1, *ж*).

Индицирование микроэлектронограмм позволило установить фазовый состав данного слоя стали. Было обнаружено, что непосредственно под оксидной пленкой располагается нанокристаллический подслой, имеющий ГЦК кристаллическую решетку, т.е. являющийся γ-фазой на основе железа (аустенитом). Рефлексов α-фазы в поверхностном слое стали не выявлено.

При сухом трении контртела по поверхности образца стали 110Г13 образуются частицы износа различных морфологических фракций (рис. 2). Одна группа частиц имеет сферическую форму и малые размеры, другая состоит из плоских частиц с размерами, достигающими 500 мкм и больше. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что плоские частицы являются частицами стали Гадфильда, сферические частицы состоят из оксидов и их нельзя отнести к какой-либо одной стали исследуемого сопряжения. Об образовании оксидных фаз свидетельствует светлый контраст, формирующийся вдоль поверхности частиц порошка. Этот контраст связан с образованием диэлектрического слоя, который и состоит из оксидов элементов, участвующих в трении.

Исследования фазового состава показали, что оксиды представляют собой оксиды железа и марганца. Оксидная пленка имеет поликристаллическое строение, размер кристаллитов 15...25 нм. На нанометровый диапазон структуры оксидной пленки указывает также кольцевое строение микроэлектронограммы, полученной с частиц порошка (рис. 2, *д*).

На торцевой поверхности втулок после испытаний по схеме "вал–втулка" со скоростью скольжения 0,02 м/с и небольших давлениях наблюдали полосы скольжения на глу-

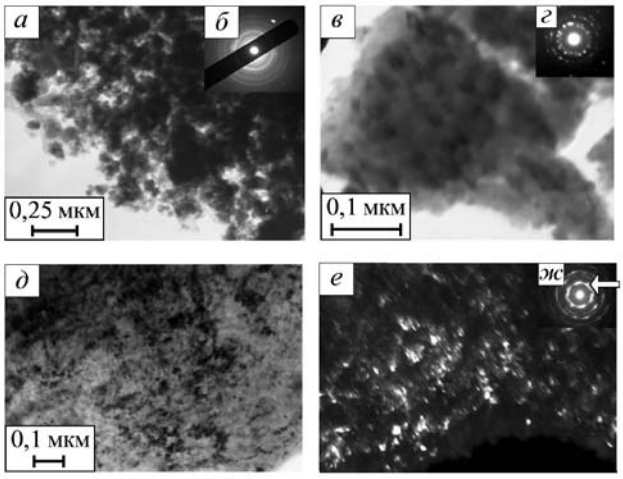


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение оксидного слоя состава Fe_2O_3 (*а–г*) и примыкающего к нему подслоя металла (*д–ж*), образующихся при сухом трении контртела по поверхности стали 110Г13:

а, *в*, *д* – светлые поля; *б*, *г*, *ж* – микроэлектронограммы; *е* – темное поле, полученное в рефлексе [002]γ–Fe (рефлекс темного поля указан на (*ж*) стрелкой)

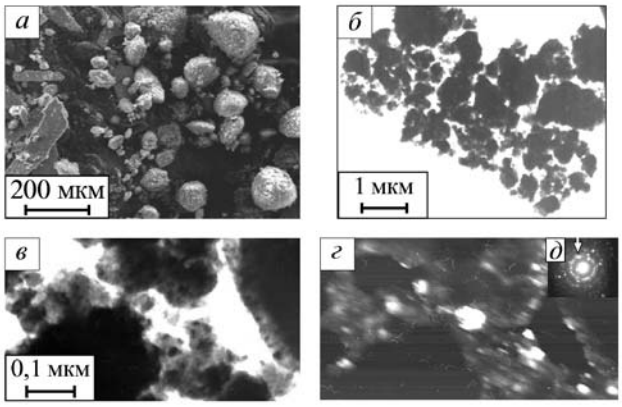


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения частиц порошка, формирующегося в процессе сухого трения контртела по поверхности стали 110Г13:

а – сканирующая микроскопия; *б–д* – просвечивающая электронная микроскопия; *б*, *в* – светлые поля; *г* – темное поле, полученное в рефлексе типа [202] Mn_3O_4; *д* – микроэлектронограмма (стрелкой указан рефлекс темного поля)

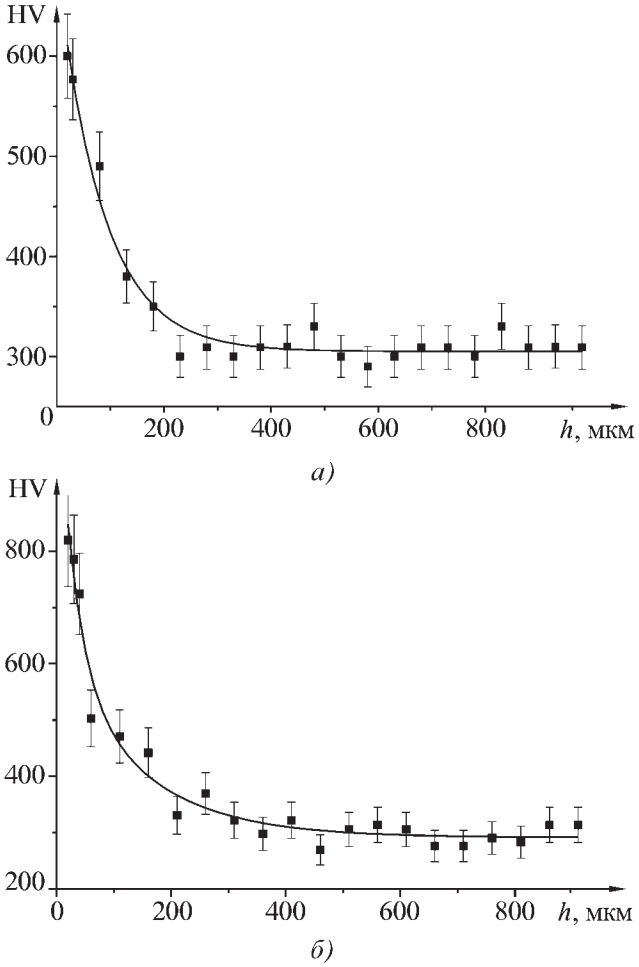


Рис. 3. Микротвердость поверхностного слоя после испытаний на трение при различном давлении в сопряжении:
а – 2 МПа; *б* – 4 МПа

бине до 1 мм при давлении 2 МПа и более 2 мм при давлении 4 МПа. В работе [4] отмечено, что повышение твердости поверхностного слоя стали 110Г13 при трении вызвано деформированием. В связи с этим интересно сопоставить глубину, на которую распространяется деформация, и распределение твердости в деформированном слое.

Микротвердость измеряли на боковой поверхности, на которой образовался рельеф, и в поперечном сечении образцов. В обоих случаях значения микротвердости одинаковые. На рис. 3 показаны кривые изменения микротвердости в поперечном сечении образцов в зависимости от глубины слоя *h*. Из рис. 3 следует, что увеличение давления в сопряжении от 2 до 4 МПа привело к росту глубины деформированного слоя от 300 до 500 мкм, определенного по изменению микротвердости. Глубина деформированного слоя не совпадает с глубиной, на которой наблюдаются полосы скольжения. Можно предположить, что микротвердость чувствительна к деформационной структуре, сформированной на микроскопическом уровне, тогда как деформационный рельеф отражает мезоскопический уровень деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Попов В.Л., Колубаев А.В.** Анализ механизмов формирования поверхностных слоев при трении // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 6. С. 818–826.

2. **Рубцов В.Е., Колубаев А.В.** Пластическая деформация и квазипериодические колебания в трибологической системе // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 11. С. 63–69.

3. **Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Вагин И.Н. и др.** Генерация звука при трении скольжения // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 19. С. 6–13.

4. **Коршунов Л.Г.** Структурные превращения при трении и износостойкость аустенитных сталей // ФММ. 1992. № 8. С. 3–21.

5. **Сильман Г.И.** Сплавы системы Fe–C–Mn. Часть 4. Особенности структурообразования в марганцевых и высокомарганцевых сталях // МиТОМ. 2006. № 1. С. 3–7.

Елена Анатольевна Алешина, инженер;
Юрий Федорович Иванов, д-р физ.-мат. наук;
Александр Викторович Колубаев, д-р физ.-мат. наук;
Ольга Владимировна Сизова, д-р физ.-мат. наук;
Сергей Валерьевич Коновалов, канд. техн. наук;
Виктор Евгеньевич Громов, д-р физ.-мат. наук

М.В. Паринов, Е.М. Чижова *(Воронежский государственный технический университет)*

Гальваномеханическое хромирование с адаптивной коррекцией режимов обработки

Описана технология гальваномеханического хромирования (ГМХ) валков двух- и многовалковых станов холодной листовой прокатки, отличающаяся наличием системы адаптивной коррекции режимов обработки с обратной связью, которая позволяет гарантированно получать качественные покрытия с заданными характеристиками. Разработано математическое обеспечение системы, включающее в себя модель формирования остаточных напряжений в покрытиях, полученных ГМХ. Приведены результаты апробации технологии.

The article considers the technology of galvanic-mechanical chromium-plating (GMCP) of rolls of two- and multirolled mills of cold sheet rolling. Considered technology is noted by the system of adaptive correction of process rates with back coupling, that guarantees the manufacture of qualitative coatings with preset properties. The mathematical support of the system has been developed that includes the model of tempers forming in coatings manufactured by GMCP. The results of industrial application are presented.

Наиболее изнашиваемыми деталями прокатных станов являются валки, которые в обычных условиях меняют до 10 раз за смену [1]. К их поверхностному слою предъявляют жесткие требования по шероховатости (*Ra* до 0,04 мкм и менее), микротвердости, качеству поверхности (отсутствие трещин и других дефектов) [1]. Хромирование позволяет значительно увеличить износостойкость валков станов холодной прокатки. Электролитическое хромирование не позволяет получить требуемые характеристики покрытий без дополнительной механической или термической обработки.

Известна технология гальваномеханического хромирования (ГМХ) [2], позволяющая при определенных режимах обработки получать износостойкие беспористые покрытия без сетки трещин. Такие покрытия имеют повышенную износостойкость, микротвердость, адгезию, чрезвычайно низкую шероховатость поверхности (*Ra* до 0,02 мкм) и характеризуются сжимающими остаточными напряжениями, которые благотворно влияют на физико-механические свойства деталей с покрытиями [3]. Это позволяет рекомендовать технологию ГМХ для обработки валков станов холодной прокатки для повышения их износостойкости и качества поверхности.

Выявлена взаимосвязь адгезии хромовых покрытий с остаточными напряжениями в них [4]. Некоторые исследователи [5] полагают, что микротвердость хромовых покрытий также зависит от остаточных напряжений в них. Таким образом, контролируя и управляя знаком и значением остаточных напряжений, можно добиться получения покрытий, имеющих требуемые характеристики.

При ГМХ с твердым полированным инструментом возможно получение сжимающих и растягивающих остаточных напряжений в осадке. Выявлены режимы ГМХ, при которых покрытия гарантированно осаждаются со сжимающими остаточными напряжениями [2]. Однако при ГМХ крупногабаритных деталей или при нанесении покрытий большой толщины для ведения процесса с оптимальными режимами обработки требуется значительный рабочий ток или большая длительность процесса. При этом возникает проблема поддержания режимов обработки на оптимальном уровне. Несоблюдение режимов ГМХ приводит к получению покрытий с характеристиками, отличающимися от заданных: например, с растягивающими напряжениями и, соответственно, с трещинами и порами в них.

Решение проблемы по поддержанию оптимальных режимов обработки в течение всего процесса ГМХ возможно путем непрерывного контроля с оперативной автоматической коррекцией каждого фактора техпроцесса.

Наибольшую сложность вызывает поддержание температуры электролита на постоянном уровне. Значительные токи, применяемые при ГМХ, приводят к интенсивному нагреву электролита. В связи с высокой инерционностью процесса оперативное регулирование температуры с помощью попеременного включения систем нагрева и охлаждения затруднительно.

Однако анализ известных математических моделей, описывающих влияние режимов обработки на остаточные напряжения в покрытиях, получаемых ГМХ [2], показал, что при изменении одного или нескольких режимов обработки возможно стабильное получение необходимых остаточных напряжений в покрытиях (т.е. заданных эксплуатационных характеристик покрытий). Для этого необходимо изменять режимы обработки, допускающие оперативное

регулирование (например, плотность тока) таким образом, чтобы достичь заданного уровня остаточных напряжений.

Общий вид модели:

$$\sigma = f(i,\ T,\ p)\ , \qquad (1)$$

где σ – остаточные напряжения; *i, T, p* – режимы обработки (плотность тока, температура электролита и давление инструмента на обрабатываемую поверхность соответственно).

При σ = const:

$$i = f(T,\ p)\ ; \qquad (2)$$

$$p = f(i,\ T)\ . \qquad (3)$$

Таким образом, получение деталей с хромовыми покрытиями, обладающих заданными свойствами, возможно при поддержании оптимальных режимов ГМХ в течение всего процесса обработки и их адаптивной коррекции на базе моделей процесса ГМХ с использованием автоматизированных устройств, включающих микропроцессорные системы и ПК.

Известные физические модели процесса формирования остаточных напряжений в покрытиях, полученных ГМХ [2, 4, 6], являются качественными и не учитывают технологических режимов обработки. Предлагаемая модель описывает зависимость послойного распределения остаточных напряжений в хромовых осадках, полученных ГМХ с учетом режимов обработки.

Новизна разработанной модели заключается в возможности использования технологических режимов обработки в качестве входных данных и учете жесткости материала покрытия.

Согласно разработанной модели остаточные напряжения в *k*-м слое покрытия σ_k, Па, составят

$$\sigma_k = K_0[E]\left(\sigma_{kx} + \sum_{i=k}^{n'}\left(-\sigma_т\left(1{,}02\cos\frac{\pi y_k}{2h} + 1{,}155\right) + \nu\frac{4{,}76\sigma_т}{\pi h^2}\left(-(2y_k^2 + 1{,}17h^2)\left(-\pi + 2\,\mathrm{arctg}\frac{1{,}6y_k}{h}\right) - 2{,}5hy_k\right)\right)\right) + K_1 k + K_2\ , \qquad (4)$$

где K_0, K_1, K_2 – коэффициенты, учитывающие реальные условия ГМХ: $K_0 = 6\cdot10^{-14}$;

$$K_1 = \frac{200 - \nu_и}{10}\cdot10^5\ , \qquad (5)$$

где $\nu_и$ – частота возвратно-поступательного движения инструмента, дв. ход/мин;

$$K_2 = \frac{400}{\nu_д}\cdot10^7\ , \qquad (6)$$

где $\nu_д$ – частота вращения обрабатываемой детали, об/мин; *h* – глубина проникновения пластической деформации, м:

$$h = 3\cdot10^{-5}\,p_y^{1,2}\,H_{\max}^{-0,5}\,(T - 313) + 3\cdot10^{-6}\ , \qquad (7)$$

где p_y – давление инструмента на обрабатываемую поверхность, МПа; $H_{\max}$ – твердость материала основы, НВ; *T* – температура электролита, К;

y_k – расстояние от инструмента до *k*-го слоя, м:

$$y_k = \delta + (i - k)\,\Delta d\ , \qquad (8)$$

где δ – толщина диффузионного слоя, м; *i* – плотность тока, кА/м^2; Δ*d* – толщина элементарного слоя покрытия, м:

$$\Delta d = (2{,}3 + 0{,}4i - 0{,}038T)\cdot10^{-7}\ , \qquad (9)$$

n' – число слагаемых при расчете суммы остаточных напряжений, образующихся в результате механического воздействия инструмента на *k*-й слой покрытия:

$$n' = \min(n,\ k + m - 1)\ , \qquad (10)$$

где

$$n = \frac{H}{\Delta d}\ ; \qquad (11)$$

$$m = \frac{H - \delta}{\Delta d}\ , \qquad (12)$$

где *H* – толщина покрытия, м;

[*E*] – матрица жесткости; σ_{kx} – напряжение в *k*-м слое покрытия, возникшее в результате структурных изменений при осаждении хрома без механического воздействия; $\sigma_т$ – предел текучести, Па; ν – коэффициент Пуассона.

Для создания системы адаптивной коррекции режимов ГМХ применяли рассмотренную выше модель. При этом использовали принципы, изложенные в выражениях (1)–(3). Результирующие остаточные напряжения при этом определяются как среднеарифметическое от напряжений в каждом слое покрытия:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n}\sigma_k\ . \qquad (13)$$

Экспериментальная проверка показала адекватность и высокую точность модели: отклонение расчетных значений от экспериментальных данных составляет не более ±15 % (рис. 1 см. на 3-й полосе обложки). Интервалы входных значений параметров модели приведены в таблице. Максимальный интервал ограничивает область входных значений, в которой проводили тестирование модели, в результате которого сделаны выводы о ее работоспособности и адекватности. Рекомендуемый интервал ограничивает область режимов обработки, в которой гарантируется получение сжимающих остаточных напряжений в покрытиях.

При тестировании значения, вычисленные по модели, сравнивали с результатами экспериментальных исследований, приведенными в [2] и полученными авторами статьи.

Для исследования остаточных напряжений в покрытиях были разработаны методика, использующая алгоритмы численного дифференцирования, и автоматизированная установка для определения распределения остаточных напряжений в покрытиях по слоям.

По результатам экспериментальных исследований получили математическую модель, описывающую зависимость остаточных напряжений в хромовых покрытиях, полученных ГМХ, от режимов обработки:

$$\sigma = 695 - 356p + 16{,}9i - 10{,}8T\ . \qquad (14)$$

Полученная математическая модель подтверждает правильность разработанной модели (4).

Увеличение остаточных напряжений с ростом плотности тока можно объяснить повышением скорости осаждения хрома, что приводит к увеличению толщины элементарного слоя. При этом толщина деформируемого слоя покрытия остается неизменной. Также предполагается, что дополни-

Интервалы входных значений параметров модели

Параметр	Максимальный интервал	Рекомендуемый интервал
Плотность тока, кА/м^2	5...30	6...15
Температура электролита, К	328...368	335...353
Давление инструмента на обрабатываемую поверхность, МПа	0,3...4	0,8...2,5
Частота возвратно-поступательного движения инструмента, дв. ход/мин	50...200	80...200
Частота вращательного движения детали, об/мин	30...200	40...120
Толщина наносимого покрытия, мкм	10...300	30...60

тельное влияние оказывает адсорбция водорода, выделение которого на катоде с ростом плотности тока интенсифицируется.

С увеличением температуры происходит уменьшение скорости осаждения хрома, что по описанному выше механизму приводит к снижению остаточных напряжений. Дополнительное влияние на снижение остаточных напряжений с повышением температуры электролита оказывают интенсивный переход гексагональной модификации хрома в кубическую и увеличение пластичности осадка.

С ростом давления инструмента на обрабатываемую поверхность увеличивается глубина деформируемого слоя, поэтому остаточные напряжения уменьшаются (возрастают сжимающие напряжения).

Металлографические исследования подтвердили взаимосвязь знака остаточных напряжений с дефектами в виде пор и трещин в хромовых покрытиях. Результаты исследований приведены на рис. 2 (см. на 3-й полосе обложки).

Из рис. 2 следует, что хромовое покрытие, обладающее сжимающими внутренними напряжениями, имеет однородную структуру без видимых дефектов на поверхности и по сечению. Покрытие с растягивающими остаточными напряжениями имеет трещины, что ведет к снижению сопротивления усталости.

Результаты исследований и данные из работы [2] подтвердили правильность подхода по построению системы адаптивной коррекции режимов ГМХ на базе разработанной модели (4). Однако предложенная модель не является окончательным вариантом. Предполагается, что в модели могут быть скорректированы некоторые коэффициенты и добавлены дополнительные возможности.

Для расширения возможностей и модернизации системы адаптивной коррекции режимов обработки, в том числе разработанной модели (4) при эксплуатации системы на установке ГМХ, целесообразно использование технологии ГМХ с адаптивной коррекцией режимов обработки, имеющей обратную связь (в частности, по остаточным напряжениям). Структурная схема предлагаемой технологии представлена на рис. 3 (см. на 3-й полосе обложки).

Сущность технологии заключается в следующем: управляющий программный комплекс, содержащий базу данных типовых технологических процессов и математических моделей, осуществляет выбор оптимального технологического процесса для получения хромового покрытия с заданными пользователем свойствами. Выбранные параметры технологического процесса передаются программе управления установкой ГМХ с модулем адаптивной коррекции режимов обработки. После обработки партии из нее берется одна деталь для исследования (в частности, остаточных напряжений в покрытии, также целесообразно исследовать микротвердость, шероховатость поверхности и другие характеристики).

Исследование осуществляется на автоматизированном оборудовании. Его результаты автоматически передаются в управляющий программный комплекс, который осуществляет их интерпретацию и запись в базу данных. Таким образом, формируется статистика, показывающая взаимосвязь между параметрами технологического процесса и характеристиками получаемых покрытий. Для уточнения и модификации моделей можно использовать отдельные системы анализа и встроенные модули управляющего программного комплекса.

Разработанная технология ГМХ с адаптивной коррекцией режимов обработки с обратной связью была испытана и апробирована на производстве для крупногабаритных деталей (рис. 4 и 5 см. на 3-й полосе обложки).

Особенностью установки является применение частичного погружения детали в электролит, что позволяет снизить рабочий ток и объем гальванической ванны.

Техническая характеристика установки ГМХ крупногабаритных деталей

Максимальные размеры деталей, мм:
- диаметр 2000
- длина 2500

Частота вращения шпинделя, об/мин . . . . . 0...20

Частота возвратно-поступательного движения инструмента, дв. ход/мин . . . . . 0...120

Температура электролита, °С . . . . . 40...90

Напряжение электролиза, В . . . . . 0...24

Ток электролиза, А . . . . . 0...630

Давление инструмента, МПа . . . . . 0,5...5,5

Применение технологии ГМХ с адаптивной коррекцией режимов обработки для крупногабаритных деталей позволило полностью исключить брак, вызванный отклонением от заданных режимов обработки. После ГМХ детали имеют высокую микротвердость покрытий (до 1100 HV) и параметр шероховатости их поверхности *Ra* до 0,02 мкм и менее.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Полухин В.П.** Валки многовалковых станов / В.П. Полухин, М.Л. Бернштейн, А.Ф. Пименов, Г.С. Быковский, О.И. Шаврин, В.А. Николаев, Л.Т. Крекнин, В.А. Савинов, М.Ю. Лайко, В.В. Кожухов и др. // М.: Металлургия, 1983. 128 с.
2. **Чижов М.И.** Гальваномеханическое хромирование деталей машин / М.И. Чижов, В.П. Смоленцев. Воронеж: ВГТУ, 1998. 162 с.
3. **Михайлов А.А.** Обработка деталей с гальваническими покрытиями. М.: Машиностроение, 1981. 144 с.
4. **Чижов М.И.** Разработка комбинированного процесса получения беспористых износостойких хромовых покрытий для высокоресурсных изделий ... дис. д-ра техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2006. 227 с.
5. **Поперека М.Я.** Внутренние напряжения электролитически осаждаемых покрытий. Новосибирск: Западно-Сибирское книжное изд-во, 1966. 335 с.
6. **Чижов М.И.** Нанесение покрытий с необходимыми служебными свойствами // Совершенствование отраслевого производства на основе внедрения передовой технологии и прогрессивного оборудования: мат. отраслевой конф. Воронеж: НИИАСПК, 1987. С. 113–114.

Максим Викторович Паринов, инженер;
Екатерина Михайловна Чижова, инженер

УДК 669.14.018.29

Б.Н. Матвеев *(Московский государственный университет приборостроения и информатики)*

Новые виды материалов и заготовок для автомобилестроения (обзор зарубежной и отечественной литературы)

Представлен обзор зарубежной и отечественной литературы, посвященной автомобилестроению. Показано, что в последние годы разработаны новые типы листовых сталей с повышенными прочностью, пластичностью, сопротивлением усталости и ударным нагрузкам; расширяется применение при штамповке комбинированных сварных заготовок, заготовок с переменной толщиной листа, облегченных многослойных заготовок. Новые типы материалов и заготовок позволяют снизить массу автомобиля и удельный расход топлива.

The paper views foreign and domestic press devoted to the motor-car construction. It is shown that the new types of sheels with increased mechanical properties have been developed last years. The application of combined welded blanks, blanks with tapered thickness, layered blanks is getting larger at stamping production. New types of materials and blanks allows to decrease the mass and the fuel rate of the cars.

Металлурги развитых стран для удовлетворения требований автомобильной промышленности постоянно разрабатывают новые виды проката и заготовок, позволяющие уменьшить массу легкого автомобиля в целях экономии топлива и повышения безопасности пассажиров.

Корпус автомобиля среднего класса составляет 26 % его массы, шасси – 23 %, двигатель – 21 %. На фирме Крайслер предполагают, что в перспективе массы кузова и шасси будут уменьшены на 50 %, двигателя – на 10 %, топливной системы – на 55 %. В результате общая масса автомобиля уменьшится на 40 % (с 1450 до 870 кг), а расход топлива снизится на 2,6 л на 100 км.

В среднем европейском автомобиле массой 1100 кг стальные детали составляют 62 %, цветные металлы (Al, Mg) – 8 %, пластмасса – 10 %, резина – 4,5 %, стекло – 3 %, ткани и противошумные материалы – 4 %, краски и клеи – 1,5 %, жидкости и прочие материалы – 7 %. Материалы составляют 30 % в цене автомобиля [1, 2]. В связи с высокой стойкостью к атмосферным воздействиям пластика и алюминия увеличивается их применение для изготовления ненесущих деталей, крыльев, дверей и багажника.

Снижение массы автомобиля повышает эффективность использования потребляемых им энергии и топлива. На рис. 1–3 показано влияние массы автомобиля на его эксплуатационные характеристики [3, 4].

Снижение удельного расхода топлива не только экономит средства, но и необходимо для уменьшения загрязнений окружающей среды.

Во многих случаях масса автомобиля может быть существенно снижена путем уменьшения толщины листа корпусных деталей и использования сталей повышенной прочности с хорошей деформируемостью. Однако уменьшение толщины листа делает более важной его защиту от коррозии путем нанесения металлических и органических покрытий. Возрастающее значение приобретает применение комбинированных, сваренных из различных по толщине и составу материалов заготовок (например, сталь–алюминий).

Из всех конкурирующих материалов сталь имеет наиболее приемлемую комбинацию таких важных свойств, как прочность, штампуемость, свариваемость и окрашиваемость. Механические свойства стали позволяют создавать компактные и прочные опорные конструкции. Преимуществом стали также является возможность сравнительно легко ремонтировать конструкции и использовать стальной лом.

Требования по коррозионной стойкости удовлетворяют путем оптимизации наносимых на сталь покрытий. В США и Западной Европе распространено мнение, что современный автомобиль должен потреблять порядка 3 л бензина на 100 км.

Так как масса кузова среднего автомобиля составляет 25...30 % от общей массы, уменьшение толщины автолиста при повышении его прочности и штампуемости позволяет существенно снизить массу машины. Таким образом сталь с повышенными механическими свойствами остается основным материалом для массового производства наземных транспортных средств, так как ее применение не связано с коренными изменениями технологии автомобилестроения. Масштабы мирового выпуска автомобилей (более 60 млн в год) стимулируют повышение характеристик стали и снижение затрат на ее производство.

В 90-х годах прошлого века ведущие производители стали Япония, Германия, Швеция, США и другие страны решили объединить усилия с целью разработки новых видов сталей и

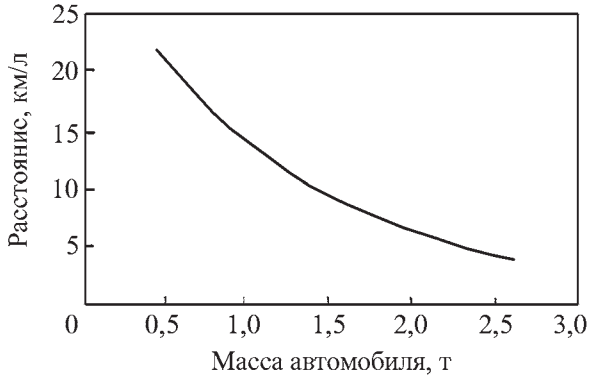


Рис. 1. Влияние массы автомобиля на расстояние, проходимое им при расходе 1 л топлива (усредненные данные по многим сериям испытаний и маркам автомобилей)

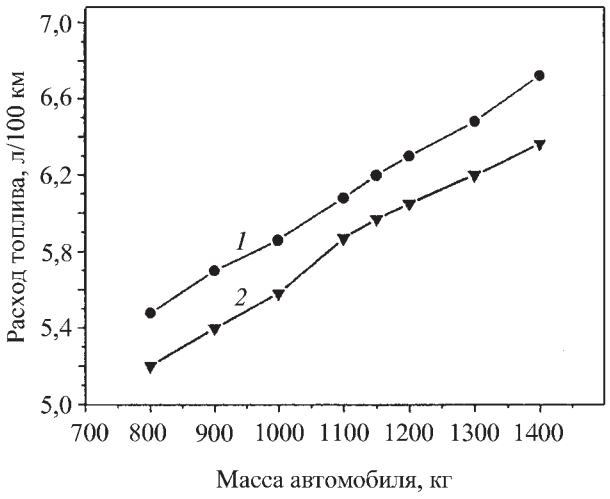


Рис. 2. Зависимость расхода топлива автомобиля Ford Focus от его массы:

1 – двигатель объемом 1,6 л; *2* – 1,4 л

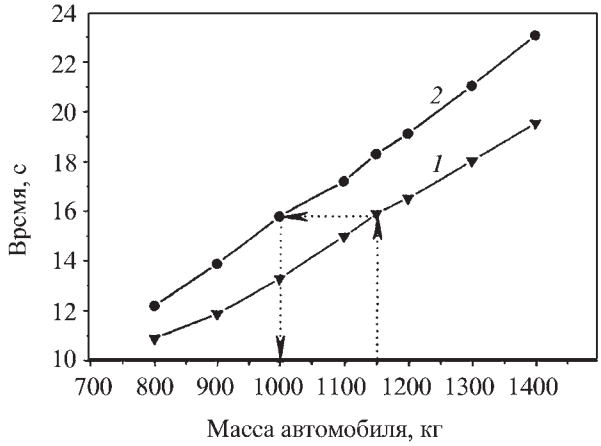


Рис. 3. Зависимость времени ускорения с 80 до 120 км/ч на 5-й передаче автомобиля Ford Focus от его массы:

1 – двигатель объемом 1,6 л; *2* – 1,4 л

других материалов для автомобилестроения в целях существенного снижения массы автомобиля без усложнения технологии изготовления и повышения себестоимости. При международном институте чугуна и стали (IISI) был создан комитет AUTOCO в целях разработки материалов для сверхлегких, экономичных, безопасных для человека и окружающей среды автомобилей без повышения базовой стоимости.

Были разработаны программы, направленные на снижение массы стальных корпусов (ULSAB), дверей и капотов (ULSAC), систем подвески (ULSAS). В проекте ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) приняли участие 35 металлургических фирм из 18 стран. Для снижения массы корпуса автомобиля на 25 % согласно проекту ULSAB необходимо применять более прочные стали, совершенствовать конструкции узлов автомобиля и технологические приемы штамповки и сварки деталей (комбинированные заготовки, гидроформовка, лазерная сварка).

Сорок лет назад кузовные детали изготовляли преимущественно из низкоуглеродистой раскисленной алюминием стали. Позднее широкое распространение получили процессы вакуумирования стали и непрерывного отжига широких холоднокатаных полос.

Характеристики листовых сталей, которые начали поставлять на автозаводы в конце XX в., приведены в табл. 1. Новые стали сочетают способность к глубокой вытяжке с относительно высокими показателями прочности, которые при весьма низком содержании углерода достигают микролегированием титаном, ниобием, бором. Расширилось применение двухфазных сталей (DP), сталей, легированных фосфором, сталей, упрочняющихся после штамповки, а также при сушке после лакирования (BH – упрочнение), IF- и TRIP-сталей повышенной прочности. Характеристики этих сталей приведены в работах [1–10].

Новые разработки направлены на улучшение соотношения прочности и пластичности (штампуемости) сталей. В частности, у тонколистовых сталей BH, DP и ULC (особо низкоуглеродистая: 0,002...0,005 % C) хорошая деформируемость вследствие низкой исходной прочности листа сочетается с существенным упрочнением при нагреве после штамповки (табл. 2).

Из таких сталей штампуют корпусные детали автомобилей, как правило, после нанесения слоя цинка. Чем ниже содержание в твердом растворе примесей внедрения, тем выше способность листа к глубокой вытяжке. IF-стали отличаются тем, что содержащиеся в них углерод, азот и сера полностью связаны Ti и/или Nb.

При наличии в стали Al необходимое количество Nb зависит только от содержания углерода (Nb = 7,74C). В случае низких содержаний C, N и S для стабилизации требуются небольшие добавки Ti = 0,036 % или Nb = 0,023 %, незначительно повышающие стоимость стали.

При совместном применении Ti и Nb образуются соединения TiN, NbC и MnS. Такая стабилизация предпочтительнее использования одного титана, так как способствует уменьшению охрупчивания при холодной обработке и повышению прочности соединения при точечной сварке. Температура конца горячей прокатки такой стали должна быть выше температуры фазового превращения (обычно 900 °C или выше).

Получаемые из особо низкоуглеродистых сталей корпусные детали машин в ряде случаев оказываются недостаточно твердыми и легко повреждаются острыми предметами. Во избежание этого применяют стали, отличающиеся мягкостью и пластичностью при штамповке и твердеющие при нагреве после лакирования с существенным повышением предела прочности. BH-эффект объясняется тем, что атомы внедрения в твердом растворе (C и N) затрудняют движение дислокаций. Новые разработки повышают эффект упрочнения при более низких температурах лакирования, выбираемых с учетом экономических и экологических требований. Японская фирма JFE Steel использует добавки азота для повышения BH-эффекта (Bake Hardening – сушка окрашенных деталей при температуре 180 °C, в результате которой происходит их твердение).

Наиболее эффективным способом повышения прочности ULC- и IF-сталей при сохранении хорошей штампуемости является добавка фосфора, который при содержании 0,1 % мас. увеличивает прочность на 100 МПа.

Для сильно нагруженных деталей рекомендуют двухфазные и TRIP-стали (табл. 3).

Структура листовой стали DP состоит из феррита и мелкодисперсного мартенсита (до 20 %). При охлаждении проката фазовое превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ должно завершиться при достаточно высокой температуре. Затем необходимо быстрое охлаждение до температуры, меньшей температуры мартенситного превращения во избежание образования перлита и бейнита.

Производство DP-сталей быстро увеличивается. Например, в фирме SOLLAC Lorrane, Франция, за 2 года оно возросло в несколько раз, достигнув в 2002 г. почти 15 тыс. т, причем 50 % этой стали поступает на автозаводы [2].

Стали типа TRIP имеют более высокое содержание углерода, марганца и кремния. Обычно их отжигают в межкритической области и охлаждают до промежуточной температуры со скоростью не менее 50 °C/с, при которой мартенситное превращение не происходит, но при изотермической вытяжке в течение 2...3 мин при температуре около 400 °C образуется бейнит с

1. Характеристика сталей для автомобилестроения

Виды сталей	Годы выпуска	Типовой химический состав, % мас.						Механические свойства					
		C	Si	Mn	P	N	Добавки	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	*r*	*n*	ВН, МПа
Микролегированная (HSLA)	1975	0,05	0,02	0,3	0,01	0,005	0,04 Nb	320*	440	28	1,3	0,17	–
Легированная фосфором	1978	0,05	0,02	0,5	0,07	0,005	–	280*	420	32	1,6	0,19	–
Твердеющая при подогреве (Bake Hardening)	1985	0,005	0,02	0,2	0,035	0,004	–	210*	320	40	1,6	0,22	48
Высокопрочные (IF)	1985	0,003	0,01	0,35	0,05	0,003	0,2 Ti; 0,04 Nb; 0,01 B	220*	390	37	1,9	0,21	–
Двухфазная (DP)	1981	0,1	0,2	0,7	0,05	0,005	–	350*	600	27	0,9	–	40
Пластичная при превращениях (TRIP)	1990	0,15	1,2	1,5	0,01	0,005	–	400**	640	32	–	–	–
Особо низкоуглеродистая (ULC)	1990	0,002	0,01	0,15	0,03	0,002	0,03 Ti	200**	300	45	2,0	0,24	40

*Колпаковый отжиг.

**Непрерывный отжиг

Примечание. *r* – параметр анизотропии; *n* – показатель упрочнения; ВН – эффект упрочнения при сушке после окраски.

2. Механические свойства особо низкоуглеродистых сталей в зависимости от микролегирующих добавок

Тип стали	Направление испытаний	$\sigma_{т\ макс}$, МПа	$\sigma_{в\ макс}$, МПа	δ, %	*r*	*n*	C	Ti	Nb	B
							% мас.			
FeP06	2	160	300	42	1,7	0,21	0,003	0,070	–	–
FeP06G	2	160	300	44	1,8	0,21	0,003	0,030	0,020	–
GA180	1	190	350	38	1,5	0,20	0,003	–	0,020	0,0012
GA220	1	230	370	34	1,4	0,19	0,003	0,030	0,020	0,0020
GA260	1	270	400	30	1,3	0,18	0,003	0,030	–	0,0015

Примечание. 1 – поперечное; 2 – продольное; *r* – параметр анизотропии; *n* – показатель упрочнения

минимальным содержанием карбидов, а остаточный аустенит насыщается углеродом (до 1 % и более), смещающим точку мартенситного превращения ниже комнатной температуры. Типичное соотношение фаз в TRIP-стали следующее: (% объемн.): 50 феррит; 45 бейнит; 5 остаточный аустенит. По сравнению с другими высокопрочными сталями ($\sigma_в \geq 600$ МПа) эти стали обладают наилучшими показателями штампуемости, сопротивления усталости и поглощения энергии удара [3].

Пластичность TRIP-сталей обусловлена наличием в ферритобейнитной матрице остаточного аустенита, превращающегося в процессе штамповки в мартенсит. Это превращение тормозит локализацию деформации, увеличивает относительное удлинение и штампуемость листов. Фазовое превращение можно регулировать, изменяя температуру деформации. Оно начинается и развивается там, где степень деформации наибольшая. Это уменьшает концентрацию деформации, увеличивает степень удлинения образцов. В процессе глубокой вытяжки деформация фланца облегчается, а деформация стенки стакана затрудняется, т. е. повышается штампуемость при больших силах прижима фланца, исключающих складкообразование.

Из TRIP-сталей изготовляют высокопрочные детали сложной формы методом холодной штамповки с использованием деформационного упрочнения. Однако необходимость тщательного контроля химсостава и режимов обработки несколько ограничивают области применения этих сталей.

TRIP- и DP-стали обладают повышенной способностью поглощать энергию удара, что важно для разработки систем безопасности.

Японские фирмы NKK и JFE Steel производят легко штампуемые оцинкованные листы из особо мелкозернистой стали SFG (super fine grain), с троекратным по сравнению с традиционной IF-сталью содержанием углерода и достаточным для исключения примесей внедрения и образования дисперсных карбидов содержанием ниобия.

Уменьшение содержания упрочняющих твердый раствор элементов (Si, Mn, P) облегчает процессы цинкования и сварки. Благодаря особо мелкозернистой структуре и высокому коэффициенту нормальной анизотропии (параметр *r*) сталь имеет повышенные характеристики штампуемости [8, 13]. Выпущены оцинкованные листовые стали категории прочности 590...980 МПа с низким эквивалентным содержанием углерода,

3. Типичные составы и механические свойства DP- и TRIP-сталей [1]

Тип стали	C	Mn	Si	Al	Прочие	Аустенит, %	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
	% мас.								
DP	0,09	1,55	0,38	–	0,013P; 0,15S	–	320	650	32,5
	0,14	1,11	0,39	0,04	0,028 Nb	–	390	629	21,5
	0,07...0,1	0,6...1,8	0,40	0,02...0,06	0,6...1,2 Cr+Mo	–	320	630	26,0
TRIP	0,4	1,2	1,2	–	–	25	500...861	980...1360	15...38
	0,2	1,2	1,2	–	–	15	–	700	34
	0,1	1,04	2,07	–	–	4...11	470	690	30
	0,12	5,1	–	–	–	20...30	400	1000	15...20
	0,12	2,0	–	–	–	10	–	–	–
	0,28	1,50	1,41	0,66	–	16	489	813	36
	0,19	1,42	0,55	0,92	–	15	460	645	33
	0,15	1,5	0,6	–	0,1P	10	470...500	725...790	19...26
	0,140	0,92	0,11	–	4,0Ni	5...10	320...500	620...700	22...30
	0,28	0,80	0,30	–	0,2Mo; 1,0Cr	12	740	900	17
	0,16	0,50	0,30	–	1,6Cr; 1,5Ni	12	700	880	18
	0,16	1,30	0,40	–	0,01Nb	8	365	810	10...20

что облегчает точечную сварку и повышает прочность соединения. Добавки Ti, Nb и Mo не ухудшают свариваемость листов и не затрудняют нанесение покрытий.

Зарубежные металлургические фирмы поставляют легко штампуемые оцинкованные стальные листы со смазывающими органическими и неорганическими покрытиями. В качестве такого покрытия на фирме JFE Steel наносят слой соединения Ni–Fe–O толщиной 50 нм, который повышает не только штампуемость, но и свариваемость, так как предотвращает образование хрупкого соединения Cu–Zn на контакте с медным электродом.

На рис. 4 [14] приведены механические свойства сталей для различных деталей автомашин. Высокопрочная многофазная сталь CP имеет в мелкозернистой структуре тонкие выделения твердых фаз. Наиболее высокую прочность (до 1400 МПа) имеют мартенситные стали TMS (Thyssen martensitische Stahl).

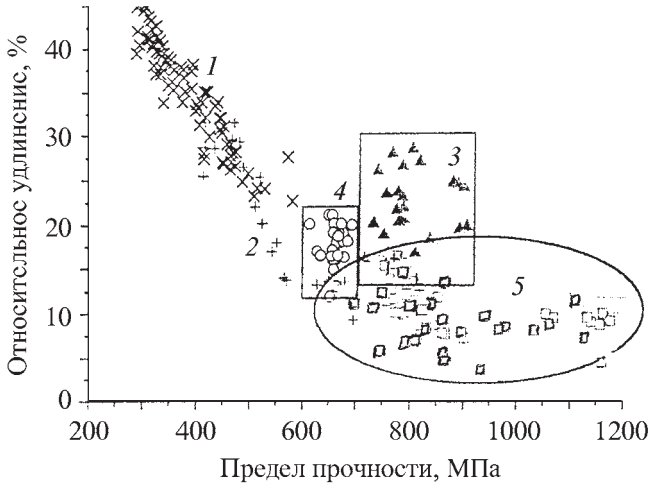


Рис. 4. Механические свойства сталей:

1 – традиционные; *2* – бейнитно-мартенситные; *3* – двухфазные (DP-стали); *4* – TRIP-стали; *5* – многофазные на бейнитной основе

Высокопрочные многофазные стали имеют мягкую ферритную матрицу с включениями одной или нескольких твердых фаз. Двухфазные ферритно-мартенситные стали обладают высокими показателями деформационного упрочнения, пластичности и искусственного старения, $\sigma_т/\sigma_в \leq 0,5$. Старение происходит за счет аустенитно-мартенситных превращений с изменением объема, которым способствуют подвижные дислокации у границ фаз феррита и мартенсита. Механическими свойствами можно управлять ($\sigma_т$ = 450...1000 МПа), контролируя объемную долю мартенсита. Благодаря способности поглощать энергию удара и минимальному влиянию отверстий на охрупчивание эти стали рекомендуются для буферных элементов автомобилей.

На рис. 5 приведены кривые главных деформаций при листовой штамповке (диаграммы FLD, характеризующие штампуемость листов в условиях плоской деформации, виды которой схематически показаны в правой части рисунка) [15]. С повышением прочности стали минимумы главной деформации ε_1 (FLD_0) снижаются.

Японские фирмы NKK и JFE Steel разрабатывают автомобильные листовые стали класса прочности 780...980 МПа под маркой NANO Hiten (New Application of Nano Obstacles for dislocation movement) с расположенными рядами в ферритной матрице твердыми включениями (NbC, TiC, $TiMoC_2$) размером около 3 нм и высокой термической стабильностью свойств. Упрочненные термообработкой (980...1470 МПа) холоднокатаные стальные листы этой фирмы обладают необходимой для получения деталей сложной формы штампуемостью. Уменьшение анизотропии свойств листов из высокоуглеродистой стали, приводящей к фестонистости получаемых вытяжкой деталей, достигают размельчением цементита и управлением текстурой рекристаллизации [8].

Производство высокопрочной стали для автомобилестроения быстро возрастает. Например, в Японии в течение 5 лет производство стали с пределом прочности 590 МПа возросло в 14 раз, а с пределом прочности 980 МПа – в 4 раза [13].

Около 20 лет назад сделаны первые попытки промышленного применения заготовок переменной толщины для штамповки деталей автомобилей. Заготовки TWB (Tailor Welded Blanks) получают сваркой отдельных частей [16–18], однако возникают проблемы, связанные с зонами термического влияния и размещением сварного шва в требуемой позиции. В про-

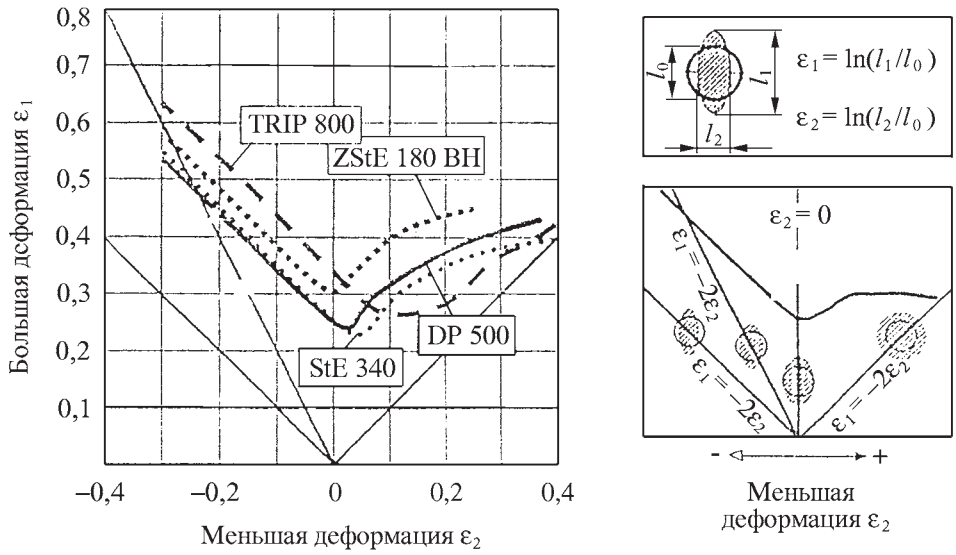


Рис. 5. Кривые предельных деформаций ε_1 и ε_2 тонколистовых сталей

цессе штамповки переменная толщина и наличие сварного шва влияют на перемещение композиционной заготовки и вызывают дополнительный износ штампового инструмента.

Заготовки переменной толщины можно получать, изменяя зазор между валками в процессе прокатки листа. Этот процесс был, в частности, исследован в немецком институте IBF (г. Аахен, Германия). Полученные заготовки названы TRB (Tailor Rolled Blanks) [19, 20]. Система автоматического управления положением валка гарантируют минимальные отклонения от заданных толщин в отдельных зонах листа (± 0,05 мм). Переходные участки имеют клиновидность 1:100. Заготовки переменной толщины шириной до 750 мм прокатывают на фирме Muhr and Bender (Mubea) в г. Атендорн, Германия, в объеме 70 тыс . т в год. После прокатки заготовки проходят термообработку, нанесение покрытий, а затем подвергаются правке, резке и штамповке.

При глубокой вытяжке тонкостенных деталей из заготовок переменной толщины необходим соответствующей формы прижим [21]. При недостаточной длине переходного участка движение заготовки приводит к местной потере контакта заготовки с прижимом и образованию гофр.

Для повышения качества штампованных деталей разработан многослойный гибкий прижим с полиуретановым элементом толщиной 10 мм, заключенным в стальных листах толщиной 2 мм. В работе [20] описаны также процессы гибки и обтяжки заготовок переменной толщины. Наличие утолщенной части в штампуемой заготовке позволяет избежать образование утонченных зон в получаемых обтяжкой штампованных деталях.

На фирме Carl Wezel KG, Германия, разработаны методы периодической многоэтапной прокатки (DMS) для получения заготовок с изменяющейся по длине толщиной и метод получения совместной прокаткой биметаллических заготовок, способных заменить сварные заготовки TRB, применяемые для штамповки деталей автомобилей [22].

Применение многослойных листов – весьма эффективный способ снижения массы автомобиля. Многослойные листы с полостями в срединной зоне обеспечивают при минимальной массе необходимые характеристики жесткости и сопротивления изгибу, так как сопротивление изгибу повышается с увеличением расстояния между несущими пластинами (например, двутавровая балка).

Многослойные материалы для автомобилестроения разрабатывает фирма Thyssen Krupp Budd and Innovation Centre. Новые материалы должны быть не дороже традиционных. Например, вместо алюминиевого листа толщиной 0,94 мм можно применить трехслойный лист, имеющий стальные оболочки толщиной по 0,3 мм и пенистую сердцевину толщиной 0,5 мм, при этом композитный лист весит на 13 % меньше алюминиевого при одинаковой величине момента сопротивления изгибу. Такие листы свариваются и окрашиваются. Кроме того, они обладают шумозащитными и теплоизолирующими свойствами.

Подобные многослойные детали изготовляют следующим образом. Два тонких стальных листа подвергают совместной обработке в штампе, оснащенном нагревательными элементами. Затем материал сердцевины инжектируют в жидком виде в пространство между стальными оболочками под определенным давлением. После раскрытия штампа извлекают слоистую заготовку. В работе [23] в качестве примера описано изготовление слоистой панели с размерами 300×450×3 мм, у которой плотность пенистой синтетической сердцевины равна 0,5 кг/мм^3, а оболочки выполнены из стальных листов толщиной 0,3 мм.

Заключение

Металлурги промышленно развитых стран, поставляющие листовую сталь автостроительным компаниям, уделяют повышенное внимание совершенствованию химического состава и режимов механической, термической и термомеханической обработки в целях достижения наилучших сочетаний прочности и обрабатываемости (цинкование, холодная штамповка, точечная сварка, лакирование).

Интенсивно развивается производство особо низкоуглеродистых сталей с микродобавками легирующих элементов с весьма высокими показателями штампуемости и многофазных высокопрочных сталей, повышающих безопасность автомобилей при столкновениях.

Интересные работы проводят в направлении производства и применения листов переменной толщины, композитных, сварных и прокатанных листовых заготовок, заготовок с пористой сердцевиной.

Новые виды листовых сталей и композитных заготовок способствуют снижению массы корпусных и других деталей автомобилей, экономии топлива и повышению безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bleck W.** Cold-rolled, high-strength sheet steels for auto applications // JOM. 1996. Juli. P. 26.

2. **Kvačkaj T., Pokorný I.** Auto body sheets for a new car generation // Metalurgija, N 41, 2002. P. 37–42.

3. **Senuma T.** Physical metallurgy of modern high strenght sheets // ISIJ International. 2001. N 6. P. 520–532.

4. **Веземанн Ю., Кунце Р.** Роль материалов в производстве автомобилей нового поколения // Черные металлы. 2005. Апрель. С. 56–59.

5. **Tobe T., Seino Y.** Newly developed steel sheets with new and advanced functions to meet customer's needs // Kawasaki Steel Technical Report. 2001. N 44. P. 71–77.

6. **Титов В.** Стальной прокат для автомобильной промышленности за рубежом // Национальная металлургия. 2004. Октябрь–ноябрь. С. 84–89.

7. **Иводитов В.А.** Автомобильная сталь // Производство проката. 2005. Ч. 1. № 1. С. 37–44. Ч. 2. № 2. С. 36–45. Ч. 3. № 3.

С. 38–48. Ч. 4. № 4. С. 38–47. Ч. 5 № 5. С. 37–47. Ч. 6. № 6. С. 40–47.

8. **Materials** and technologies for automotive use / T. Sekita et. al. // JFE Technical Report. 2004. N 2. P. 1–18.

9. **Patel J., Hulka K.** Niobium in ULC–IF and BH type strip steel for the automotive industry // Nordic Steel and Mining Review. 2002. N 3. P. 88–91.

10. **Современное** состояние производства и применения IF-стали (по материалам Международной конференции "IF Steels 2003") / В.С. Юсупов и др. // Производство проката. 2004. № 5. С. 11–20.

11. **Retained** austenite characteristics and stretch-flangeability of high-strenght low-alloy TRIP type bainitic sheet steels // ISIJ International. 2002. 42. N 4. P. 450–455.

12. **Effect** of hot-rolling conditions on tensile properties of multiphase steels exhibiting a TRIP effect / S. Godet et. al. // Steel Research. 2002. N 6–7. P. 280–286.

13. **Yamazaki K.** Current situation and properties of ultra-high strength steel for automotive use in Japan // La Revue de Métallurgie. 2003. Juillet-Août. P. 779–786.

14. **Microstructure** and properties of hot-rolled high strength multiphase steels for automotive application / I.Y. Pyshmintsev et. al. // Steel Research. 2002. N 9. P. 392–402.

15. **Древес Э.Ю., Энгль Б., Крузе Й.** Стали повышенной прочности: настоящее и будущее // Черные металлы. 1999. Октябрь. С. 48–55.

16. **Sacco J.E.** Blanks create opportunity to expand steel potential // American Metal Market. V. 16. Nov. 1999.

17. **Prange W., Schneider C.** Tailored Blanks – ein Werkstoff für neue Formen der Konstruktion // Thyssen Technische Berichte Heft. 1992. N 1.

18. **Weissner R.** Ein neuer Weg im Karosseriebau // Brech Rohre Profile. 1993. N 40.

19. **Hauger A., Kopp R.** Kintmatishe Erzeugung von belastungsangepassten Langprodukten mit einem über Länge variablen Querschnitt mittels Walzen // Abschlusskolloqium zum DFG Schwerpunktprogramm Flexible Umfortechnik, Verlag Mainz, Aachen, 1995.

20. **Manufacturing** of sheet metal parts from Tailor Rolled Blanks / G. Hirt et. al. // Journal for Technology of Plasticity. 2005. N 1–2. P. 1–12.

21. **Kopp R., Wiedner C., Krahn M.** Verhalten von Tailor Rolled Blanks im Tiefziehprozess und in der Hochdruckblechumformung // Aachener Stahl Kolloqium (ASK), Aachen, 2004.

22. **Bauder H.-J.** Rolling metods for profiled strips // MPT International. 2006. N 2. P. 96.

23. **Greve B.N.** Sandwich panel construction for lightweight vehicle designs // ThyssenKrupp techforum. December 2004.

Борис Николаевич Матвеев, д-р техн. наук

УДК 621.373.826

Л.А. Павеле *(Тульский государственный университет)*

Выбор оптимального способа термической резки металлов

Представлены и систематизированы критерии выбора оптимального способа термической резки. Изучено влияние критериев на качество и стоимость резки. Показано, что только комплексный технико-экономический анализ позволяет обоснованно выбирать оптимальный способ разделения материалов для конкретных производственных условий.

Criteria of the selection of an optimal method for thermal cutting are presented and systematized. The influence of the criteria on quality and cost is studied. It is shown that only an integrated technical and economic analysis allows to make a profound selection of an optimal method for the cutting of materials in a specific working environment.

Научные исследования и проектно-конструкторские работы в области перспективных способов резки металлов подчинены сегодня трем целям:

– улучшению качества продукции;

– повышению гибкости технологий;

– повышению экономичности этих технологий по сравнению с обычными способами резки.

Выбор оптимального способа обработки применительно к заданным условиям производства должен быть комплексным, учитывающим группы экономических и технических критериев. Простое сравнение по производительности и стоимости на метр реза для различных процессов показывает неудовлетворительные результаты, не учитывающие качество кромок, форму изделия, необходимость предварительной и последующей обработки, а также номенклатуру изделий и серийность выпуска, а потому не позволяет произвести комплексную экономическую и техническую оценку.

Критерии выбора оптимального способа обработки

Технико-экономические критерии выбора оптимального способа резки можно разбить на две взаимопроникающие группы: технические и экономические (табл. 1).

Технические критерии, относящиеся к детали, включают в себя как геометрические параметры (например, толщину и форму детали), так и точность соблюдения размеров, технические требования, состояние детали после обработки, а также технологические потери и отходы. Выбор этих критериев основан на том, что они заключают в себе весь технологический процесс изготовления детали, начиная от марки и толщины материала и заканчивая состоянием детали после обработки.

Технические критерии, относящиеся к установке, включают в себя скорость резки, мощность, тип, расход и чистоту режущего газа, что позволяет рассчитать не только себестоимость изделия, но и сравнить установки между собой. При выборе оборудования также важно учесть структуру производства, которая включает в себя тип производства и программу выпуска,так как некоторое оборудование просто по техническим показателям выбирать нецелесообразно.

Экономические критерии при сегодняшнем состоянии отечественной промышленности становятся практически ключевыми. Поэтому при выборе оборудования необходимо просчитать не только себестоимость изделия (или метра реза), но и стоимость расходных материалов. Также по причине частой

1. Критерии оценки эффективности методов резки

Аспект	Критерии	
	технические	экономические
Деталь	Материал: толщина; геометрия; технические требования; точность соблюдения размеров; качество кромок; подготовка поверхности; технологические потери и отходы материала	Трудоемкость; себестоимость; материалоемкость; отрасль промышленности
Установка	Скорость резки; мощность; тип газа; расход газа; чистота газа; тип горелки; диаметр сопла; количество режущих головок параметры оптики	Производительность; производственные инвестиции; гибкость
Структура производства	Тип оборудования; тип производства; программа выпуска	Вид портфеля заказов

смены номенклатуры изделий, их модернизации и т.д. необходимо учесть такой критерий, как гибкость производства.

Процесс решения любой задачи можно рассматривать как процесс последовательного получения (выбора) некоторых частных решений по конкретным значениям исходных условий (параметров), определяющих этот выбор. Такими частными решениями будут отдельные критерии выбора оптимального способа обработки.

Критерий стоимости

Спрос на определенные виды оборудования для термической резки на российском рынке сильно отличается от рынка европейского. Это различие объясняется техническим состоянием, экономическим спадом производства на многих промышленных предприятиях России. Небольшие объемы выпуска не позволяют предприятиям развивать собственную производственную базу.

Особенно остро эта проблема стоит перед малыми и средними предприятиями, на которых существующая программа выпуска и номенклатура изделий не позволяют мобилизовать в нужном объеме ресурсы, необходимые для внедрения прогрессивных технологий. Стоимость же технологического оборудования нового поколения достаточно высока. Для примера в табл. 2 приведены ориентировочные цены на новое и бывшее в употреблении (б/у) лазерное оборудование отечественного и импортного производства.

На сегодняшний день лазерные технологии по интенсивности развития не уступают компьютерной отрасли, но в отличие от компьютерных технологий, которые почти целиком монополизировала США, российские лазерные разработки не уступают зарубежным. В основном стоимость любого лазерного оборудования, произведенного в России, ниже цен на аналогичное

2. Стоимость лазерного оборудования по данным 2003 г., тыс. дол. США

Тип оборудования	Новое импортное	Б/у импортное	Новое отечественное	Б/у отечественное
Комплекс для раскроя металла толщиной 6...8 мм	300...500	150...250	100...200	30...80
Комплекс для раскроя металла толщиной 15...20 мм	400...800	250...500	250...400	–

3. Технико-экономические показатели различных способов резки

Способ резки	Сумма инвестиций, у.е.	Расходные материалы	Минимальное расстояние между двумя резами, мм
Плазма, кислород	2	Электроэнергия, газ	5
Плазма, вода	3	Электроэнергия, газ, вода	10
Плазма, газ нейтральный или раскисляющий	3	Электроэнергия, газ	10
Кислородная резка	1	Газ для нагрева, газ для резки	10
Лазер CO_2	4	Электроэнергия, газ	1,2

иностранное оборудование в 2...4 раза. Это объясняется тем, что используются в основном отечественные комплектующие.

Затраты на внедрение новой технологии в производство всегда высоки. Поэтому оценка перспективности способа резки в условиях конкретного предприятия должна быть многофакторной и разносторонней. В табл. 3 представлены суммы инвестиций в условных единицах для различных технологий резки. Наибольшие затраты приходятся на лазерную резку.

Сравнение стоимости 1 м реза стали некоторыми термическими способами резки, выполненные ведущими европейскими специалистами в области разработки технологий и оборудования для резки и сварки – "MESSER GRIESHEIM", представлено на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при лазерной резке стали толщиной 5 мм стоимость 1 м реза составляет около 1 у.е. Если учесть, что в данном примере рассмотрена лазерная установка с излучателем мощностью 3 кВт, то можно предположить, что при использовании новейших лазеров с суперимпульсным режимом модуляции и мощностью до 6 кВт (технологический лазер японской фирмы Fanuc) лазерная резка будет дешевле плазменной на толщинах 10...15 мм. А с учетом дополнительной экономии она становится более предпочтительной и на толщине

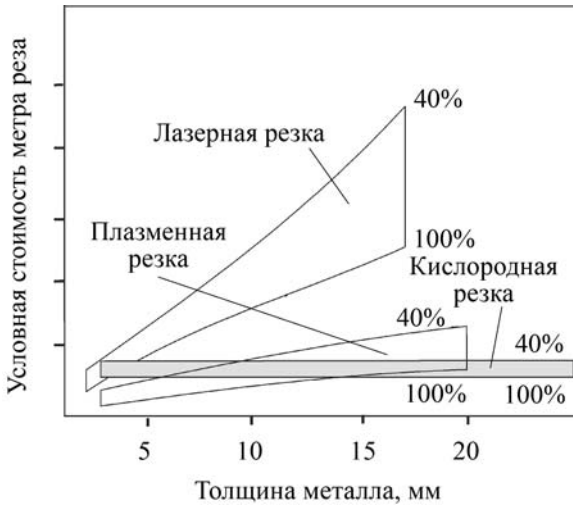


Рис. 1. Сравнение стоимости резки при коэффициенте использования времени 40 и 100 %

20 мм. Это покрывает 50...80 % ассортимента используемых в машиностроении сталей. Кроме того, на этом же оборудовании можно резать и стали большей толщины (хотя стоимость резки 1 м будет несколько дороже, чем при автогенной или плазменной), а также выполнять маркировку и разметку на той же операции.

Проанализировав опубликованные данные, можно сделать вывод о том, что наиболее целесообразно применять лазерную резку для партий мелких и средних деталей (100...1000 шт), особенно при обработке деталей со сложным контуром. При резке лазером мелких партий деталей затраты уменьшаются по сравнению с резкой гильотинными ножницами и штамповкой в 2...4 раза за счет устранения операции разметки, занимающей 70 % времени, идущего на обработку, значительного снижения отходов материалов. По данным А.Н. Сафонова на 1997 г. на одном из предприятий Кумертау изготовление 300 статоров электродвигателей с помощью программируемой штамповки было дороже лазерной резки на 180 % [1].

4. Способ резки для различных материалов

Способ резки	Материал					
	Углеродистые стали	Коррозионно-стойкие стали	Алюминий	Титан	Пластмасса	Керамика
Газовая	3	0	0	2	0	0
Плазменная	3	3	3	2	1	0
Лазерная	3	3	2	3	2	2
Механическая	3	3	3	3	3	1
Водяной струей	1	1	2	1	3	2

Примечание. 3 – способ очень эффективен; 2 – способ пригоден; 1 – способ возможен; 0 – способ невозможен.

Критерий толщины металла

Рекомендуемые области применения термических методов резки в зависимости от толщины деталей по данным фирмы "Linde" приведены на рис. 2. Наиболее рациональная область применения лазерной резки лежит в диапазоне толщин 1...12 мм, плазменной резки – 2...120 мм. По данным Н.И. Никифорова современные высококонцентрированные технологии термической резки – лазерная и плазменная – имеют преимущество в скорости перед традиционным способом кислородной резки для сталей толщиной до 30 мм.

Критерий свойств материала

Одними из основных параметров, определяющих выбор того или иного способа резки, являются теплофизические и механические свойства разрезаемых материалов. В зависимости от этого критерия можно выбрать приоритетный способ обработки (табл. 4).

Критерий точности соблюдения размеров и качество кромок

Точность соблюдения размеров и качество кромок после резки являются самыми главными аспектами, побуждающими предприятия использовать в производстве современные технологии с дорогостоящим и сложным оборудованием. Общая величина допуска на деталь после резки формируется из четырех составляющих: допуска на струйную неточность технологического процесса, допуска на неточность машины, допуска, связанного с тепловыми деформациями и корректирующего допуска на размер. То есть для получения в качестве конечного результата высокой точности вырезаемых деталей необходимо рассматривать как единый взаимосвязанный комплекс технологический процесс резки и машину для резки.

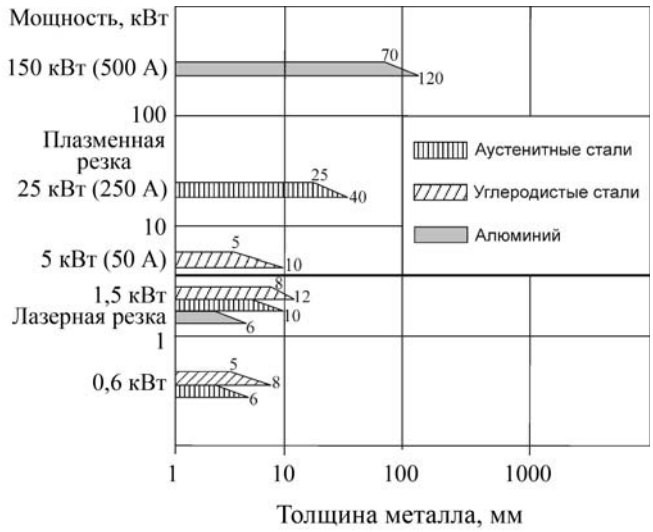


Рис. 2. Область применения различных термических способов резки по данным фирмы "Linde"

Для многих существующих способов резки требуемые допуски на соблюдение размеров и качество кромок резов можно достигнуть только при последующей дополнительной обработке. В случае наличия у детали сложного контура с жесткими допусками на размеры этот фактор может играть доминирующую роль при выборе способа резки. Резы с малыми радиусами и высокими допусками на ширину выполнить труднее. Системную оценку способа резки изделий можно проводить по табл. 5. Сумма всех затрат является мерой для комплексной оценки способов резки с точки зрения точности конструкции детали.

Если необходимо вырезать детали с большим количеством сложных резов, способность лазера обрабатывать угловые резы при наименьшей тепловой деформации является его решаю-

5. Конструктивные критерии для системной оценки способа резки

Критерий		Способ разделения материала			
		Штамповка	Резка		
			газовая	плазменная	лазерная
Радиус кромки	менее 5 мм	3	0	2	3
	более 5 мм	1	2	3	3
Допуск на ширину реза	более 0,5 мм	1	1	2	3
	менее 0,5 мм	0	0	0	2
Прямоугольный контур кромки		3	3	3	3
Наличие заусенцев при толщине листа менее 10 мм		0	0	2	2
Толщина листа	менее 8 мм	2	1	2	3
	более 8 мм	0	3	3	2
Качество кромок реза		2	1	2	3
Сумма		13	11	19	26

Примечание. 1 – затраты высокие; 2 – затраты средние; 3 – затраты незначительные; 0 – обработка невозможна.

6. Оценка состояния деталей после резки различными способами [2]

Способ резки	Скорость резки, м/мин	Ширина реза, мм	Величина ЗТВ, мм	Шероховатость поверхности реза, мкм
Лазерная	3...8	0,5...0,8	0,3...0,5	10...80
Механическая	0,05	5...10	–	15...30
Кислородная	1,0	3	5	500
Плазменная	5,0	2...3	1...2	300
Дуговая	0,1...0,3	7	10...12	500

щим преимуществом. Здесь плазменная резка однозначно отстает, так как она создает закругления кромок. Эти закругления могут быть настолько большими, что резы, полученные автогенной резкой, получаются более точными.

В табл. 6 приведены сравнительные данные по ширине реза и величине зоны термического влияния (ЗТВ) на кромках реза для лазерной, кислородной и плазменной резок для низкоуглеродистых сталей [2].

Точность при кислородной резке не всегда удовлетворяет требованиям стандарта, который устанавливает допустимые предельные отклонения вырезаемых деталей в пределах ±0,2...1,2 мм. Недостаточна также точность при вырезке сопрягаемых деталей, работающих в условиях трения, что не позволяет использовать процесс кислородной резки как финишную операцию их изготовления.

Критерий подготовки поверхности

Важным критерием для выбора технологии резки является качество подготовки поверхности разрезаемого материала (табл. 7). Для лазерной и плазменной резки требуются чистые от ржавчины поверхности. Газовая резка способствует короблению деталей, что необходимо учитывать при дальнейшей обработке.

Критерий технологических потерь и отходов материала

Традиционные механические способы обработки материалов имеют целый ряд недостатков: низкий коэффициент использования материала, высокую степень износа инструмента, низкий уровень механизации и автоматизации работ. Для сравнения, при штамповке деталей из листа образуются технологические отходы в виде перемычек, высечек, припусков на ширину кромки листа. Новые металлосберегающие технологии: лазерная и плазменная резки позволяют значительно повысить производительность работ и увеличить коэффициент использования материала более чем на 20 %. При лазерной резке резко снижается расход материалов за счет рациональной компоновки деталей на листе с учетом возможности получения совмещенных резов.

7. Критерии подготовки поверхности при различных способах резки

Способ резки	Подготовка поверхности	Обработка после резки: снятие грата, обработка резанием
Штамповка, резка на гильотинных ножницах	Не требуется	Требуется
Газовая резка	Не требуется	Требуется
Плазменная резка	Очистка от ржавчины	Требуется
Лазерная резка: – в кислороде – в азоте, аргоне	Очистка от ржавчины	 Требуется Не требуется

8. Типичные скорости различных способов резки

Материал	Толщина материала, мм	Скорость резки, мм/мин			
		Газовая резка	Плазменная резка	Лазерная резка	Гидрорезка
Углеродистая сталь	5	850	4500 (1)	2700 (3)	200
	20	660	2000 (1)	700 (4)	50
Коррозионно-стойкая сталь	3	–	5000 (2)	3000 (4)	200
	40	–	500 (2)	–	10...120
Алюминий	2	–	600 (2)	4500 (4)	800
	40	–	1200 (2)	–	80

Примечание. (1) – азотная плазма, 500 А; (2) – аргоно-водородная плазма, 240 А; (3) – CO_2-лазер, 1500 Вт, резка в кислороде; (4) – CO_2-лазер, 2600 Вт, резка в азоте.

Критерий производительности

Важный критерий оценки эффективности использования того или иного способа резки – это производительность процесса. Оценить производительность оборудования можно по скорости одного метра реза для различных групп материалов определенной толщины (табл. 8).

С точки зрения рациональной организации производства важно, чтобы отдельные операции органично вписывались в общий производственный процесс. Поэтому временны́е характеристики, такие как скорость резки, могут являться определяющими, чтобы не создавать дисбаланса в организации производства и не ставить перед необходимостью модернизации и адаптации к оборудованию для резки всех звеньев технологической цепи.

Критерий гибкости

В промышленности установлены дополнительные требования к гибкости применяемых обрабатывающих установок, чтобы сократить долю дополнительного времени и времени на переналадку. В этом плане выпускаемые промышленные комплексы лазерной, плазменной и гидроабразивной резок характеризуются высокой гибкостью, что делает их наиболее конку-

9. Парк специальных промышленных роботов в Японии

Технологическое назначение	Количество специальных промышленных роботов по операциям, шт		Прирост специальных промышленных роботов с 1994 по 1999 г., раз
	1994 г.	1999 г.	
Газовая сварка	75	226	3,0
Лазерная сварка	9	235	26,1
Лазерная резка	47	279	5,9
Гидроабразивная резка	26	447	17,2

рентоспособными в условиях мелкосерийного и частопереналаживаемого производства.

Международная федерация роботехники (IFR) в своем обзоре только по Японии приводит весьма интересные данные о численности роботов, предназначенных для автоматизации лазерной сварки и резки, газовой сварки и гидроабразивной резки. В табл. 9 дана количественная информация о парке специальных роботов для сварки и родственных технологических операций и темпе его роста в период 1994–1999 гг.

Выводы

В настоящей работе представлены и систематизированы критерии выбора оптимального способа термической резки.

Но по отдельным критериям нельзя сделать вывод о рациональности использования того или иного способа, так как применительно к конкретной детали с учетом ее конструктивных особенностей, размеров и допусков, и заданным производственным условиям, способ разделения материала может кардинально измениться.

Поэтому для определения оптимального к конкретным производственным условиям способа обработки предприятие может осуществить следующие действия:

1) заказать стоимостную сравнительную оценку в фирме–производителе оборудования или фирме, занимающейся продажей оборудования (с упрощенными техническими критериями);

2) провести расчет себестоимости изготовления деталей к конкретным условиям производства самостоятельно (без учета технических критериев);

3) провести комплексный технико-экономический анализ по каждому критерию, представленному в настоящей работе, и, основываясь на полученных данных, выбрать оптимальный способ, соответствующий производству и его возможностям на данный момент.

Действуя методом постепенного исключения параметров для каждого случая, можно получить один или несколько оптимальных способов резки. Решающим аргументом в пользу одного из них является экономический аспект.

Обобщив приведенные критерии в сводную таблицу (таблицу соответствия), можно сделать вывод о том, какой способ разделения материала имеет в целом преимущества по техническим и экономическим возможностям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сафонов А.Н.** Производство и использование лазерной техники для обработки материалов // Сварочное производство. 1997. № 2.

2. **Коваленко В.С. и др.** Малоотходные процессы резки лучом лазера. Киев: Техника, 1987. 112 с.

Лариса Арвидовна Павеле, канд. техн. наук

Памяти Льва Григорьевича Юдина (1927–2006)

Ушел из жизни Лев Григорьевич Юдин, доктор технических наук, профессор, крупный специалист в области теории и технологии обработки металлов давлением. Он родился 14 марта 1927 г. в г. Ногинске Московской области в семье служащего.

В 1930 г. семья переехала в Тулу, где в 1934 г. Лев Григорьевич поступил в школу. В 1941 г. семья была эвакуирована в г. Белово Новосибирской области, где он продолжил обучение в школе. С 1944 г. после возвращения из эвакуации Лев Григорьевич поступил в железнодорожный техникум МПС и в 1946 г. закончил его по специальности техник-механик по путевым машинам. До 1948 г. он работал на Тульском механическом заводе Министерства путей сообщения лаборантом-браковщиком. С 1948 по декабрь 1952 г. Л.Г. Юдин – студент Тульского механического института. По окончании института направлен на Тульский комбайновый завод на должность технолога. С 1953 по 1957 г. работал начальником техбюро, а затем – руководителем группы.

С 1957 г. Л.Г. Юдин занимался преподавательской деятельностью: ассистент на кафедре "Технология штамповочного производства", с января 1960 по 1966 г. – старший преподаватель. Л.Г. Юдин в 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Теоретическое и экспериментальное изучение условий формоизменения стальных цилиндрических труб при вытяжке с утонением стенки". В 1987 г. им защищена докторская диссертация, а с 1989 г. он являлся профессором.

С 1980 г. Лев Григорьевич работал заместителем заведующего кафедрой. Им опубликованы 3 монографии, справочник, более 160 статей и получены 11 авторских свидетельств на изобретения. За создание и внедрение новых технологических процессов и оснастки он был удостоен звания лауреата премии им. С.И. Мосина и награжден серебряной и бронзовой медалями ВДНХ СССР.

За достигнутые успехи в научной, педагогической и общественной работе Лев Григорьевич неоднократно отмечался благодарностями по университету: награжден знаком "Изобретатель СССР" (1981 г.), в 1984 г. – знаком "За отличные успехи в работе Министерства высшего образования" и медалью "Ветеран труда". Ему присвоено звание Почетный работник высшего и профессионального образования РФ.

Коллектив кафедры
"Механика пластического формоизменения"
Тульского государственного университета

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**,
107076, Москва, Стромынский пер., 4/1, стр. 3
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение – 1".
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 29.03.07 г. Подписано в печать 10.05.07 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,35 (в т.ч. вкл. 0,49). Уч.-изд. л. 9,32 (в т.ч. вкл. 0,75). Заказ 761. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ОАО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в Подольской типографии – филиале ОАО "ЧПК". 142110, Подольск, ул. Кирова, д. 15.