

**Председатель
редакционного совета
и главный редактор**
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., д.т.н., доц.

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

**Зам. главного
редактора**
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., д.т.н., доц.
КОТЕНКО В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф.
ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц.
МОНАСТЫРСКИЙ В.П., д.т.н.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ОЛУНД Э., Dr. Ir.
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

**Ответственные
за подготовку и выпуск
номера:**
СЕРИКОВА Е.А.
ОРЛОВА А.В.

Журнал зарегистрирован
в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-63952
от 09.12.2015

За содержание рекламных
материалов ответственность
несет рекламодатель

Журнал распространяется
по подписке, которую можно
оформить в любом почтовом
отделении (индекс по каталогу
"Пресса России" 39205)
или непосредственно
в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Лавриненко В.Ю. К 125-летию Анатолия Ивановича Зимина	387
Евсюков С.А. 90 лет кафедре "Технологии обработки давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наследие Анатолия Ивановича Зимина	391

Литейное и сварочное производства

Вдовин К.Н., Пивоварова К.Г., Феоктистов Н.А. Исследование связующих компонентов для экологически безопасных безводных лёточных масс	396
Мосин А.А., Ерофеев В.А., Шолохов М.А., Фивейский А.М. Оптимизация двух- электродной сварки под флюсом угловых швов мостовых металлоконструкций	402

Кузнечно-штамповочное производство

Лавриненко В.Ю., Алимов А.И., Аюпов Т.Х., Изикаева А.И. Экспериментальные исследования процесса осадки заготовок из титанового сплава ВТ6 бабой молота с наполнителем	408
Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Разработка технологического процесса выдавли- вания детали типа крупногабаритного стакана со сферическим дном и фланцем	412
Платонов В.И., Романов П.В., Чудин В.Н. Расчет режимов осадки ребра на плите при их сборке	421

Прокатно-волочильное производство

Лехов О.С., Шевелев М.М. Напряженное состояние бойков установки непре- рывного литья и деформации при получении сталемедных трехслойных биметалли- ческих полос	425
---	-----

Материаловедение и новые материалы

Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С. Формирование структуры и свойств комплексно-легированной литой стали	429
--	-----

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий
для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам
научных специальностей: 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением;
05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 — Атомное
реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной
промышленности; 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов
и сплавов; 05.16.04 — Литейное производство; 05.16.05 — Обработка металлов
давлением; 05.16.06 — Порошковая металлургия и композиционные материалы;
05.16.08 — Нанотехнологии и наноматериалы и в базу данных Chemical Abstracts

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.

Chairman of Editorial
Committee and
Editor-in-chief
LAVRINENKO V.Yu.

Chairman Assistants
DEMINS V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee
BLANTER M.S.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
KUKHAR' V.D.
LARIN S.N.
MONASTYRSKY V.P.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
NURALIEV F.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
TREGUBOV V.I.
SHATUL'SKY A.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
ÖHLUND E.
TUTMANN T.

This issue prepared with
assistance of specialists:
SERIKOVA E.A.
ORLOVA A.V.

Journal is registered by
Roskomnadzor.
The certificate of
registration ПИ № ФС 77-63952,
December 9, 2015.

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 united catalogue "Pressa
Rossii" 39205) or immediately in
the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru



CONTENTS

Lavrinenko V.Yu. To 125th anniversary of Anatoly Ivanovich Zimin387
Evsyukov S.A. 90 years of "Technologies of plastic working" department of Bauman
Moscow State Technical University. Anatoly Ivanovich Zimin's legacy391

Foundry and Welding Productions

Vdovin K.N., Pivovarova K.G., Feoktistov N.A. Study of binders for ecologically safe
anhydrous tap-hole clays396
Mosin A.A., Erofeev V.A., Sholokhov M.A., Fivevsky A.M. Optimization of two-electrode
submerged arc welding of fillet welds of bridge metal structures402

Forging and Stamping Production

Lavrinenko V.Yu., Alimov A.I., Ayupov T.Kh., Izikaeva A.I. Experimental studies
of upsetting of VT6 titanium blanks by die-forging hammer filler ram408
Dmitriev A.M., Korobova N.V. Development of technological extrusion process
of oversized cup type part with spherical bottom and flange412
Platonov V.I., Romanov P.V., Chudin V.N. Upsetting calculation of edge on plate during
their assembly421

Rolling and Drawing Production

Lekhov O.S., Shevelev M.M. Stress state of anvils of continuous casting and deformation
installation during production of steel-copper three-layer bimetallic strips425

Physical Metallurgy and New Materials

Muratov V.S., Morozova E.A., Yakimov N.S. Formation of structure and properties
of complex alloy cast steel429

*Journal is included into the list of the Higher Examination Board
for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific
specialties: 05.02.09 — technologies and forming machines; 05.02.10 — welding, related
processes and technologies; 05.04.11 — nuclear reactor engineering, machines, units
and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 — physical metallurgy and heat
treatment of metals and alloys; 05.16.04 — foundry; 05.16.05 — plastic metal forming;
05.16.06 — powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 — nanotechnologies
and in Chemical Abstracts database*

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

К 125-летию Анатолия Ивановича Зимина

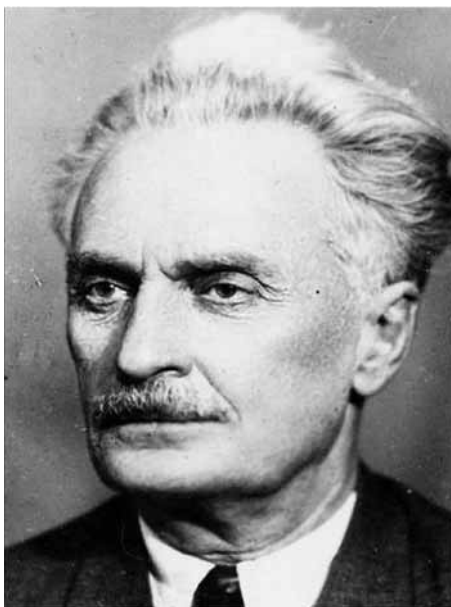
Анатолий Иванович Зимин родился 22 августа 1895 г. в городе Гаврилов Посад Суздальского уезда Владимирской губернии. После окончания гимназии с серебряной медалью в 1913 г. он поступил на механическое отделение Императорского Московского технического училища (ИМТУ, ныне — МГТУ им. Н.Э. Баумана), где обучался с перерывами в связи с отзывами на заводы для работы по выполнению оборонных заказов во время Первой мировой войны.

С 1 мая по 1 августа 1915 г. Анатолий Иванович работал токарем и подручным в механическом цехе завода братьев Каменских в Перми. По возвращении в ИМТУ (в середине августа) был назначен на работу токарем в инструментальной мастерской завода Столль в Воронеже (20 августа—10 ноября 1915 г.), а затем переведен на завод Сорново в Нижнем Новгороде токарем в шрапнельный цех (14 ноября 1915 г.—7 марта 1916 г.).

В марте 1916 г. А.И. Зимин сдал в ИМТУ экзамен на звание инструктора по шрапнельному производству и с 1 апреля 1917 г. был откомандирован в Нижний Тагил на Высокогорский механический завод инструктором снарядного производства и для руководства работами по оборудованию и налаживанию работы снарядного цеха, т.е. уже в это время стал признанным специалистом.

В 1920 г. в составе первого советского выпуска инженеров Анатолий Иванович с отличием окончил МВТУ, выполнив дипломный проект на тему "Бандажный и центропрокатный завод" под руководством профессоров Н.Ф. Чарновского и Н.С. Верещагина. После этого он был оставлен для научно-исследовательской, инженерной и преподавательской деятельности в МВТУ, в котором проработал до 1974 г.

А.И. Зимин некоторое время руководил работами в механической лаборатории и кузнечной



А.И. Зимин (1895—1974)

мастерской МВТУ (ныне — лаборатории кафедры "Технологии обработки материалов"). В 1924 г. профессор Н.Ф. Чарновский поручил ему вести занятия по проектированию кузниц, а в 1925—1926 гг. — курсковки и штамповки.

В то же время Анатолий Иванович работал в составе нового отдела испытаний авиационных материалов и конструкций Центрального аэродинамического института (ОИАМ ЦАГИ) под руководством профессора И.И. Сидорина, который одновременно был заместителем А.Н. Туполева в программе создания первых советских цельнометаллических самолетов. Под их руководством в 1922—1927 гг. А.И. Зимин вел работы

по испытанию материалов, выбору и отработке конструкций элементов самолетов АНТ-2, АНТ-3, АНТ-4 и поэтому является участником создания первых отечественных цельнометаллических самолетов. В 1932 г. ОИАМ ЦАГИ был преобразован во Всесоюзный институт авиационных материалов (ВИАМ).

В 1929 г. в МВТУ была организована кафедра металловедения. Ее возглавил профессор И.И. Сидорин. Среди первых преподавателей кафедры был и Анатолий Иванович Зимин.

В это время областью научных и педагогических интересов А.И. Зимина становятся кузнечная наука и производство. Первую научную работу по теории винтовых фрикционных молотов Анатолий Иванович выполнил в 1929 г. С 1925 г. он самостоятельно читал курс штамповки на металлургическом факультете Московской горной академии, преподавал в Московском механическом институте им. М.В. Ломоносова, где работал в должности доцента. В своих лекциях А.И. Зимин освещал комплекс вопросов, необходимых для создания эффективного кузнечного производства. Такие лекции Анатолий Иванович читал также в МВТУ, в Институте повышения квалификации.

В 1928 г. впервые в СССР была организована кузнечная лаборатория в Московском отделении Всесоюзного института металлов (МОИМ), которая разместилась в ветхом здании бывшей текстильной мастерской механического факультета МВТУ. А.И. Зимин организовал и возглавил в МОИМ кузнечную лабораторию. В 1931 г. это отделение было преобразовано в Центральный научно-исследовательский институт машиностроения и металлообработки (ЦНИИТМАШ), а кузнечная лаборатория превратилась в один из ведущих отделов всемирно известного научно-исследовательского института.

Становление и официальное утверждение кузнечной кафедры МВТУ происходило в условиях острой потребности в высококвалифицированных специалистах-кузнецах, столь необходимых для строящихся в СССР заводов и фабрик.

В 1930 г. в МВТУ впервые в нашей стране была организована кафедра "Обработка металлов давлением", руководителем которой был утвержден профессор А.И. Зимин. Он был бессменным руководителем кафедры до 1974 г., и за это время кузнечная кафедра в МВТУ стала безусловным лидером среди родственных кафедр других вузов СССР.

Кафедра под руководством А.И. Зимина первоначально осуществляла специализацию студентов в двух направлениях: по кузнечно-штамповочному и прокатно-волочильному производствам, а научную работу кафедры в это время можно определить как этап становления теории расчета кузнечных машин.

В эти годы Анатолий Иванович наряду с организацией специализированной кузнечной кафедры в МВТУ создает и возглавляет родственные кафедры в Институте повышения квалификации, в Механическом институте им. М.В. Ломоносова, в Московской горной академии, в Московском вечернем машиностроительном институте.

В 1931 г. на ряде заводов страны начались экспериментальные исследования кузнечно-прессовых машин. Первой такой работой, выполненной А.И. Зиминим, явилось испытание приводных пневматических молотов. В 1931 г. он опубликовал фундаментальный труд "Винтовой фрикционный пресс", где приведены теоретические расчеты, которые послужили основой для составления первого стандарта на кузнечные машины. В 1935 г. Анатолий Иванович провел серию экспериментов по изучению винтовых

фрикционных молотов 60 и 180 тс (600 и 1800 кН) на заводе им. М.И. Калинина в Воронеже.

В 1940 г. А.И. Зимин подготовил первый официальный учебник "Расчет и конструкция кузнечных машин. Паровоздушные молоты".

К 1941 г. под научным руководством Анатолия Ивановича было подготовлено и защищено 13 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук, среди соискателей которых были впоследствии такие крупные специалисты, как В.Ф. Щеглов (1935 г.), Е.П. Унксов и А.С. Федоров (1937 г.), директор Центрального конструкторского бюро машиностроения (ЦБКМ) Л.Н. Шевяков (1940 г.).

В 1946 г. А.И. Зимин закончил работу над докторской диссертацией "Новый принцип построения кузнечных молотов", в которой обобщил теорию винтовых фрикционных молотов (прессов). Диссертация Анатолия Ивановича наметила программу работ по исследованию и разработке новых винтовых кузнечных машин. Эти работы составили одно из главных направлений деятельности кузнечной кафедры на все последующие годы.

В 1957 г. А.И. Зимин был утвержден в ученой степени доктора технических наук без защиты диссертации.

В послевоенные годы профессора МВТУ, как правило, совмещали учебную деятельность на кафедре с научной в родственных научно-исследовательских или конструкторских организациях. Анатолий Иванович работал также в ЦБКМ научным консультантом. В это время А.И. Зимин создает методики расчета кузнечных машин, нормал и ГОСТы, ведет экспертизы по заявкам на изобретения, рецензирует проекты кузнечных машин КБ, заводов. В 1950-е годы он также принимает активное участие в обсуждении проблемы создания сверхмощных гидравлических прессов и бесшаботных молотов.

В 1953 г. вышла в свет монография А.И. Зимина "Машины и технологии обработки металлов давлением. Часть 1. Молоты", которая стала настольным учебником для студентов многих поколений.

Им разработана первоначальная обобщенная классификация, в основу которой положены характеристические признаки главных механизмов. В настоящее время она существенно уточнена, но сохранилась ее основа — подразделение на привод и исполнительный механизм. В соответствии с этими особенностями Анатолий Иванович разделял кузнечные машины на

четыре класса — механические и гидравлические прессы, молоты и ротационные машины. Им разработана периодическая система энергетических типов кузнечно-штамповочных машин в зависимости от их энергетической насыщенности и признаков рабочего хода. На основании этого А.И. Зиминым была обоснована проблема снижения массы кузнечных машин с учетом принципиальной, энергетической и конструктивных схем и заложены основы оптимального проектирования.

А.И. Зимин выступал за взаимосвязанный комплекс обобщенных параметров технологииковки и штамповки: технологичность готовой детали и соответствие ее формы требованиям технологииковки и штамповки; оптимальность механических показателей кованных и штампованных деталей (выбор материала поковки, прочность, износоустойчивость, надежность, живучесть и др.); оптимальность термомеханического режима пластической обработки давлением (нагрев, род применяемых технологических операций и переходов, характер силовых воздействий машин при штамповке и др.); оптимальность показателей характера производства (серийность, поточность, механизация, автоматизация и др.); оптимальность эксплуатационных технико-экономических показателей службы деталей.

В совершенствовании и подъеме уровня кузнечного производства А.И. Зимин придавал большое значение энергопотреблению. Приблизительная оценочная мощность всех действовавших тогда в стране кузнечно-прессовых машин (около 1 млн единиц) составляла около 10 млн кВт — примерно 5 % мощности всех электростанций СССР. Суммарная мощность, потребляемая кузнечными цехами, с учетом мощности кузнечных нагревательных печей, средств механизации и автоматизации, меж- и внутрицехового транспорта, вентиляторов, осветительных приборов, а также мощности, потребляемой на межоперационных технологических переделах, составляла около 10...15 % мощности всех электростанций страны. Таким образом, А.И. Зиминым был сделан вывод о возможности существенной экономии мощности нескольких электростанций при увеличении КПД оборудования кузнечного производства всего на 1...5 %.

Анализ вопросов энергетики кузнечного производства, экономии металла и энергии, сокращения длины технологического маршрута изготовления деталей, защиты окружающей среды

и человека от вредных проявлений техники привел А.И. Зимина к формулировке проблемы безотходного автоматизированного кузнечного производства.

Большое внимание Анатолий Иванович уделял проблемам, связанным с защитой окружающей среды. В центре его интересов — вопросы биосферосовместимости кузнечного производства, создания непрерывных безотходных совмещенных технологических процессов типа литье—штамповка, распыление порошка—штамповка и др., в которых максимально используется внутренняя теплота технологического перехода, до минимума сокращается протяженность технологического маршрута: исключаются промежуточные операции транспортировки, складирования полуфабрикатов и др.

Результаты широкого круга научно-исследовательских и конструкторских работ под руководством А.И. Зимина стали воплощаться в реальность с 1960-х годов. Это конструкции гидравлических винтовых прессов-молотов, универсальные установки непрерывного прессования изделий из пластмасс с выносными пресс-формами и многие другие. Он был инициатором нового технико-экономического направления в мощном гидропрессостроении — создании специализированных одноцилиндровых гидропрессов силой 150 и 300 МН с давлением в гидросистеме до 100 МПа (1000 кгс/см²).

А.И. Зиминым подготовлено более 80 кандидатских и докторских диссертаций, диссертации которых были защищены в диссертационных советах МВТУ, ЦНИИТМАШе и других научных институтах.

Среди учеников Анатолия Ивановича, в разные годы окончивших кафедру МВТУ или работавших под его руководством: дважды Герой Социалистического Труда, академик АН СССР А.И. Целиков, академик АН БССР С.И. Губкин, заслуженные деятели науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора Е.П. Унксов, В.И. Залесский, И.А. Норицын, Е.А. Попов, Б.В. Розанов, Г.А. Навроцкий, Л.И. Живов, А.Г. Овчинников, Е.И. Семёнов, Л.Н. Соколов, М.В. Сторожев, Л.В. Прозоров, Е.Н. Мошнин, Н.М. Золотухин, А.Д. Матвеев, И.И. Казакевич, Э.Ф. Богданов, Ю.А. Бочаров, Н.С. Добринский и другие, которые в свою очередь подготовили десятки кандидатов и докторов технических наук и тем самым развивали научную школу А.И. Зимина.

Под руководством А.И. Зимина кафедра прошла знаменательный путь от становления до значимого научно-педагогического коллектива страны, решающего важные проблемы подготовки научно-инженерных кадров, деятельность которых существенно способствовала и продолжает обеспечивать развитие теории, технологии и оборудования обработки металлов давлением и кузнечно-штамповочного производства нашей страны.

Заслуги Анатолия Ивановича перед Отечеством отмечены двумя орденами Ленина (1951 г. и 1971 г.) и присуждением в 1967 г. звания заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

А.И. Зимин был первым председателем Всесоюзного научно-инженерно-технического общества кузнецов и штамповщиков (ВНИТОКШ), являлся членом экспертных советов секций "Машиностроение" и "Металлургия" Комитета по Ленинским и Государственным премиям СССР. Он также являлся одним из инициаторов создания головного института ЭНИКМАШ и отраслевого журнала "Кузнечно-штамповочное производство", был основателем и редактором сборников МВТУ "Машины и технология обработки металлов давлением".

За выдающиеся заслуги А.И. Зимина перед МГТУ им. Н.Э. Баумана его портрет включен в галерею основателей научных школ Университета.

Имя Анатолия Ивановича Зимина носит Российская кузнечная академия (президент академии — В.П. Чекалов, д-р техн. наук, профессор, выпускник кафедры "Обработка металлов давлением МВТУ им. Н.Э. Баумана 1963 г., ученик А.И. Зимина), объединяющая с 1997 г. крупных ученых, исследователей, специалистов маши-

ностроительных предприятий и научно-исследовательских организаций в области обработки металлов давлением и выдающихся кузнецов-художников.

Анатолий Иванович Зимин скончался 23 марта 1974 г., похоронен на Никольском кладбище.

Анатолия Ивановича отличала вдумчивость, любознательность, тяга к заводскому производству, способность к критическому мышлению. Все эти качества способствовали выбору соответствующего направления научной деятельности сотрудников возглавляемого им коллектива. Кроме пытливого ума и неиссякаемой работоспособности, он обладал талантом создавать творческие коллективы, находя и привлекая к научной и педагогической деятельности способную молодежь.

А.И. Зимин был патриотом России, и ученики А.И. Зимина высоко чтут своего учителя и наставника, хранят память о нем и трудятся на благо нашей Родины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Нистратов А.Ф.** Анатолий Иванович Зимин, 1895—1974 / отв. ред. Н.С. Добринский. М.: Наука, 1985. 136 с.
2. **Дмитриев А.М.** К 110-летию А.И. Зимина // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2005. № 4 (109). С. 104—110.
3. **Овчинников А.Г., Семенов Е.И.** Анатолий Иванович Зимин. К 110-летию со дня рождения // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 8. С. 27—28.

Владислав Юрьевич Лавриненко, д-р техн. наук

90 лет кафедре "Технологии обработки давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наследие Анатолия Ивановича Зимина

В 2020 г. исполняется 90 лет кафедре "Технологии обработки давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана, первой специализированной кафедре обработки металлов давлением в СССР.

Одним из основателей и первым заведующим кафедрой с 1930 по 1974 г. был Анатолий Иванович Зимин — выдающийся советский ученый в области теории, технологии и оборудования обработки металлов давлением, основатель советской научной школы кузнечно-прессового машиностроения, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д-р техн. наук, профессор.

22 августа 2020 г. исполнилось 125 лет со дня рождения Анатолия Ивановича Зимина.

С 1974 по 1988 г. кафедру возглавлял выдающийся советский ученый в области теории и технологии обработки металлов давлением, основатель научной школы листовой штамповки, д-р техн. наук, профессор Евгений Александрович Попов. Под его руководством подготовлено более 40 канд. техн. наук и 10 д-ров техн. наук.



Е.А. Попов

В эти годы на основе периодической системы энерготипов кузнечно-прессовых машин, созданной А.И. Зиминим, на кафедре продолжают плановые работы по разработке новых конструкций кузнечно-прессовых машин. Вслед за гидровинтовыми пресс-молотами были исследованы опытные образцы кривошипного и кривошипно-коленного прессов с гидровинтовым приводом, гидровинтового пресса с встречным движением подвижных частей, а также гидровинтового пресса с разгруженной от крутящего момента станиной (д-р техн. наук, профессор Ю.А. Бочаров, д-р техн. наук, профессор А.В. Сафонов).

На основе полученных результатов исследований учеными кафедры совместно с ЭНИКМАШем

(г. Воронеж) были созданы новые конструкции гидровинтовых прессов номинальными силами 6,3 и 25 МН, разработан и выпущен ГОСТ 718—84 "Винтовые прессы".

Дальнейшее совершенствование кузнечно-штамповочных машин пошло по пути создания систем дозирования энергии, числового программного и программно-адаптивного управления. Это направление на кафедре возглавлял д-р техн. наук, профессор Ю.А. Бочаров. Под его руководством были разработаны и исследованы системы программного управления приводных пневматических молотов (Л.С. Петросян), ковочных комплексов с обратной связью по высоте поковки (В.А. Бороздин), паровоздушных штамповочных молотов (Н.Б. Бабин), адаптивного управления паровоздушных штамповочных молотов (Е.А. Юданов), программного управления для винтовых муфтовых прессов (М.Е. Маркушин), программного управления для гидровибрационных прессов (А.П. Терещенко). В 2000-х годах это научное направление получило развитие и были разработаны системы программно-адаптивного управления по массе и температуре заготовки гидropневматических молотов серии МШ (А.В. Герасимов), программно-адаптивного управления по высоте поковки гидropневматических штамповочных молотов (В.А. Антимонов), программно-адаптивного управления по массе и температуре заготовки кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) и комплексов (Ю.А. Гладков), адаптивного управления КГШП по закрытой высоте штампа на предварительном переходе штамповки (А.А. Анциферов).

Исследования в области повышения КПД главного привода тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов в это время прово-

дил д-р техн. наук, профессор Э.Ф. Богданов. Им были получены важные для теории и практики результаты исследований переходных процессов в момент включения фрикционных муфт и тормозов кривошипных прессов. Для Воронежского завода "Тяжмехпресс" была проведена оптимизация параметров электропривода (момента инерции маховика и мощности электродвигателя) всей гаммы КГШП силой до 125 МН. Например, мощность привода без уменьшения производительности пресса силой 25 МН была снижена со 125 до 90 кВт. У КГШП силой 125 МН мощность привода была уменьшена на 23 %. У всех прессов было значительно снижено потребление электроэнергии и повышен общий КПД.

Успешно работал над созданием нового кузнечно-штамповочного оборудования д-р техн. наук, профессор А.В. Сафонов. На предложенные конструкции оборудования им получено более 200 авторских свидетельств и патентов СССР, России и зарубежных стран. Разработанные А.В. Сафоновым совместно со специалистами кафедры (А.П. Носов, Ю.И. Тамарис) при участии ЭНИКМАШ винтовые прессы двойного действия вошли в номенклатуру кузнечно-прессового оборудования для их серийного изготовления, утвержденную Минстанкопром СССР. На Чимкентском производственном объединении кузнечно-прессового оборудования было освоено серийное изготовление винтовых прессов двойного действия мод. Ф3134.

А.В. Сафонов также руководил работами по созданию кривошипных и винтовых прессов с электромеханическими системами управления без использования сжатого воздуха для включения и отключения муфты и тормоза.

Одним из значимых научных и технологических направлений работы кафедры в 1980-е годы стали исследования по использованию сильных магнитных полей для пластического деформирования металлов. Значительный вклад в теорию и технологию магнитно-импульсной штамповки внесли С.М. Колесников, В.А. Дёмин, В.И. Ельсов, Л.М. Дёмина, С.Ф. Головащенко. Ими были реализованы в промышленности технологические процессы сборки неразъемных трубчатых узлов электромагнитным обжимом, разработаны методики оптимального проектирования трубчатых соединений и технологических процессов, а также прочностного расчета индукторов магнитно-импульсной обработки. В 1982 г. за работы в области магнитно-импульсной штамповки С.М. Колесников был удостоен премии Совета министров СССР.

В это же время на кафедре действовала отраслевая научно-исследовательская лаборатория, научным руководителем которой был Е.А. Попов. Основное направление работы лаборатории — исследование возможности получения композиционных материалов с особыми физическими свойствами путем воздействия на материал сверхсильных магнитных полей. На основе научного задела, полученного в лаборатории, впоследствии были защищены докторские диссертации Л.Т. Буравлевым., В.П. Ступниковым и Н.В. Коробовой.

Также Е.А. Попов возглавлял технологическое направление, связанное со штамповкой панелей теплообменников для авиационного и космического машиностроения. В этом направлении активно работали канд. техн. наук, доценты И.Н. Шубин, А.Н. Плотников, Н.Б. Мулин.

В эти годы на кафедре активно функционировало студенческое конструкторское бюро, которым руководил канд. техн. наук, доцент А.С. Езжев, который был награжден пятью медалями ВДНХ за разработку новых конструкций кузнечно-прессового оборудования.

Руководителем композитной тематики на кафедре в это время являлся канд. техн. наук, профессор В.Г. Кондратенко. Под его руководством было защищено две кандидатские диссертации (С.В. Бузинов, А.С. Белобеев) по исследованию и разработке технологии изготовления деталей из композита бор—алюминий. Кроме этого, В.Г. Кондратенко являлся крупным специалистом в области технологии горячей объемной штамповки. Всего под его руководством были подготовлены 18 канд. техн. наук.

С 1988 по 1991 г. заведующим кафедрой являлся заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, д-р техн. наук, профессор Анатолий Георгиевич Овчинников.

А.Г. Овчинников — создатель и руководитель научной школы штамповки выдавливанием. За время работы на кафедре он подготовил в качестве руководителя более 40 канд. техн. наук и 11 д-ров техн. наук. Отдельно можно отметить выдающиеся успехи Анатолия Георгиевича в области спорта и альпинизма: заслуженный мастер спорта СССР, мастер спорта международного класса, заслуженный тренер РСФСР по альпинизму, заслуженный тренер СССР по альпинизму, "Снежный барс" ("Покоритель высочайших гор СССР").



А.Г. Овчинников

А.Г. Овчинниковым была обоснована идея технологической целесообразности создания кузнечно-прессового оборудования, способного выполнять разнонаправленные перемещения рабочих элементов штампа для холодного выдавливания. Это направление получило развитие при создании специализированных гидравлических прессов с активными силами трения для холодного выдавливания деталей из порошков под руководством лауреата премии Ленинского комсомола и Государственной премии РФ в области науки и техники, члена-корреспондента РАН, д-ра техн. наук, профессора А.М. Дмитриева.



А.М. Дмитриев

Александр Михайлович Дмитриев руководил кафедрой с 1991 по 2008 г.

В это время на кафедре продолжается работа по реализации научных заделов и появились новые научные направления, связанные с математическим моделированием кинематики и динамики кузнечно-штамповочного оборудования.

Д-р техн. наук, профессор Е.Н. Складчиков проводил исследования по адаптации программного комплекса динамического анализа многосвязных систем с элементами разной физической природы ПА9 для анализа динамики кузнечно-штамповочного оборудования путем создания библиотеки математических моделей типовых конструктивных элементов оборудования.

Д-ром техн. наук, профессором А.В. Власовым была разработана методика моделирования динамических процессов кузнечно-штамповочного оборудования в виде программного комплекса PRADIS. С использованием данной методики для ОАО "Тяжпрессмаш" (г. Рязань) был выполнен анализ динамики горяче- и холодноштамповочных автоматов. Также был проведен анализ работоспособности радиально-обжимной машины номинальной силой 1600 кН. Для Коломенского завода тяжелых станков было выполнено моделирование гидравлического пресса для прессования керамической плитки номинальной технологической силой 2,5 МН, при этом предложенные конструктивные изменения позволили снизить минимальный рабочий цикл. Методика расчета была использована также для разработки конструкций кулаков грейферных подач горячештамповочных прессов в ОАО "Тяжмехпресс" (г. Воронеж).

В 2004 г. за комплекс работ по созданию новых конструкций тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов для ОАО "Тяжмехпресс" (г. Воронеж) д-р техн. наук, профессор Е.И. Семёнов и д-р техн. наук, профессор А.В. Сафонов были удостоены Государственной премии РФ в области науки и техники.

С 2008 г. по настоящее время заведующим кафедрой является д-р техн. наук, профессор Сергей Александрович Евсюков.

Основными научными направлениями его работы являются теоретические исследования формоизменяющих операций листовой штамповки для описания напряженного и деформированного состояния заготовки с учетом третьего главного напряжения (в объемной постановке), также с учетом переменности температуры при горячей листовой штамповке. Кроме этого, развивается направление, связанное с совмещением нескольких формоизменяющих операций листовой штамповки в одном технологическом переходе, в частности, операций вытяжки и встречной отбортовки (М.М. Петрушина), трех операций вытяжки, обжима и раздачи в одном переходе (Аксам Сулейман), четырех операций вытяжки, обжима, раздачи и отбортовки (Е.О. Яковлева).



С.А. Евсюков

Данная технология, основанная на совмещении операций обжима и раздачи, успешно реализована под руководством С.А. Евсюкова на Чебоксарском заводе промышленных тракторов для изготовления цилиндрических обечаек. Предложенная и внедренная технология позволила повысить коэффициент использования металла с 22 до 96 %. Руководство предприятия впервые в истории кафедры заключило с авторами лицензионный договор на использование патентов, реализующих данную технологию.

Также в настоящее время продолжают развиваться научные направления, связанные с численным анализом и компьютерным моделированием процессов обработки металлов давлением.

Д-ром техн. наук, профессором А.В. Власовым разработана методика и подпрограмма расчета долговечности штампов для горячей и холодной штамповки по результатам конечно-элементного моделирования деформации заготовки и инструмента, а также разрабатывается методика автоматизированного получения геометрии предварительных переходов горячей объемной штамповки на основе программного комплекса моделирования процессов пластического деформирования QForm.

Методы математического моделирования эволюции микроструктуры различных сплавов, в том числе титановых, в процессах пластического формоизменения разрабатывает канд. техн. наук, доцент А.И. Алимов.

На кафедре проводится разработка новых методов испытания материалов для получения

реологических свойств, используемых при математическом моделировании (д-р техн. наук, профессор А.В. Власов, д-р техн. наук, профессор В.А. Дёмин). Разработаны новые методики построения кривых упрочнения листовых материалов, используемых в автомобильной промышленности, на основе результатов экспериментов на сжатие и сдвиг.

Продолжает развиваться направление, начатое на кафедре д-ром техн. наук, профессором Ю.А. Бочаровым, связанное с получением поковок в тиксотропном состоянии. По этой тематике были защищены две кандидатские диссертации (Л.В. Хижнякова, И.М. Койдан).

Для ООО "ЧТПЗ-Инжиниринг" была разработана технология упрочнения трубной резьбы на сосно-компрессорных труб путем поверхностно-пластического деформирования с наложением ультразвуковых колебаний (С.А. Евсюков, А.И. Алимов, Ю.В. Майстров).

В 2013 г. в ОАО "Тяжмехпресс" по заказу КНР был изготовлен кривошипный горячештамповочный пресс мод. К8052 номинальной силой 165 МН, предназначенный для работы в составе автоматизированной линии для горячей штамповки поковок коленчатых валов и балок передней оси грузового автомобиля. Пресс такой силы изготовлен впервые в мире и является уникальным представителем кузнечно-штамповочного оборудования не только по величине номинальной силы, но и по габаритным размерам, массе штампуемых поковок, основным техническим характеристикам. При реализации этого проекта на кафедре было выполнено компьютерное моделирование процесса горячей объемной штамповки кривошипного вала массой 240 кг, изготавливаемого на этом прессе (С.А. Евсюков, О.А. Белокуров, Ю.В. Майстров).

В 2014 г. с участием специалистов кафедры (С.А. Евсюков, О.А. Белокуров, Ю.В. Майстров) была разработана новая технология штамповки полукорпусов шаровых кранов больших диаметров для Суходольского завода специального тяжелого машиностроения. Технологический процесс штамповки полукорпуса потребовал совмещения операций обжима, раздачи и высадки сварной трубной обечайки на одной штамповочной позиции.

Для изготовления трубопроводов современных жидкостных ракетных двигателей во ФГУП "НПО "Техномаш" был спроектирован и изготовлен станок с ЧПУ для гибки труб с узкозональ-

ным индукционным нагревом. Ведущий конструктор этого проекта — выпускник кафедры М.И. Долгополов — в 2019 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Доцентом В.А. Кривошеиным разработана и внедрена в производство автоматическая линия для штамповки номерных регистрационных знаков автомобилей. Ключевым элементом линии является правильно-подающее устройство, совмещенное с наклейкой светоотражающей подложки. Высокая точность и производительность линии обеспечивается сервоприводом с возможностью подачи ленты на заданную длину и по контрастным маркерам на светоотражающем покрытии.

В.А. Кривошеиным совместно с доцентом Ю.В. Майстровым разработана и успешно внедрена в производство автоматическая установка для нарезки высокоточных мерных гранул, используемых при нанесении медных покрытий. В установке реализована схема резки летучими ножницами, что позволило обеспечить необходимую производительность, точность и оптимальный режим работы электроприводов линии.

Новые конструкции профилегибочных станков и линий, основанных на процессах локального деформирования тонколистового металла (получено более 10 патентов), разработаны лауреатом премии Ленинского комсомола и Премии Минвуза СССР, д-ром техн. наук, профессором И.Е. Семёновым.

В 2013 г. д-ром техн. наук, профессором Е.И. Семёновым и д-ром техн. наук, профессором В.Ю. Лавриненко была предложена конст-

рукция малоинерционного медицинского молотка, обеспечивающего удар без отскока и снижение травмирования пациента, который в настоящее время успешно применяется для проведения ортопедических и травматологических операций в ряде медицинских учреждений нашей страны.

На основе этого принципа д-ром техн. наук, профессором В.Ю. Лавриненко разработана и внедрена в АО "Московский машиностроительный завод "Авангард" оригинальная конструкция ударных частей штамповочного молота с массой падающих частей 1000 кг, обеспечивающая повышение эффективности производства поковок для изготовления деталей оборонного назначения.

Разработана и внедрена в производство (О.А. Белокуров, Ю.В. Майстров, М.Г. Алленов) технология штамповки ортопедических шин со значительным изменением площади поперечного сечения по длине изделия для НИИ скорой помощи имени Н.В. Склифосовского.

За все время существования кафедра "Технологии обработки материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана с 1930 г. подготовила более 2500 инженеров, более 250 канд. техн. наук и 57 д-ров технических наук.

Кафедра шагает в ногу со временем и уверенно смотрит в будущее — как завещал ее основатель профессор Анатолий Иванович Зимин.

Сергей Александрович Евсюков, д-р техн. наук





УДК 669.1

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-9-396-401

К.Н. Вдовин, К.Г. Пивоварова, Н.А. Феоктистов
(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)

Исследование связующих компонентов для экологически безопасных безводных лёточных масс

Сделан подробный аналитический обзор существующих лёточных масс, применяемых в доменном производстве на различных металлургических предприятиях. Установлено, что при использовании лёточной массы необходимо обеспечивать экологическую безопасность. Уточнено, что для производства лёточных масс взамен вредной каменноугольной смолы используют синтетические смолы (фенолформальдегидные резольные и новолачные). Окисление каменноугольной смолы и пека протекает до температуры 600 °С, что особенно важно для больших доменных печей, оборудованных 2...4 лётками.

Ключевые слова: лёточная масса; связующее; каменноугольная смола; синтетическая смола; полициклические ароматические углеводороды.

Detailed analytical review of the existing tap-hole clays used in the blast furnace production at various metallurgical enterprises is made. It is established that it is necessary to ensure environmental safety when using tap-hole clay. It is clarified that synthetic resins (phenol-formaldehyde and novolac resins) are used instead of harmful coal-tar resin for the production of tap-hole clays. The oxidation of coal-tar resin and pitch occurs up to temperature of 600 °C, which is especially important for large blast furnaces equipped with 2...4 tap-holes.

Keywords: tap-hole clay; binder; coal-tar resin; synthetic resin; polycyclic aromatic hydrocarbons.

Лёточная масса, как разновидность неформованных огнеупоров, представляет собой многокомпонентную смесь, предназначенную для закрытия канала чугунной лётки. За последние два десятилетия значение лёточной массы в доменном производстве сильно изменилось. Если раньше ее роль сводилась только к закупорке лётки после выпуска чугуна и шлака, то в настоящее время лёточная масса дополнительно позволяет защищать от разрушения внутреннее околелёточное пространство горна и управлять скоростью и продолжительностью выпуска, оптимизируя работу всей доменной печи и увеличивая срок ее эксплуатации [1].

Ключевая роль в лёточных массах принадлежит связующим материалам. На стадиях изготовления лёточных масс и введения их в лёточное пространство связующие должны иметь необходимый уровень пластичности для

обеспечения быстрого закрытия канала лётки. Находясь в объеме лётки, они должны затвердевать, гарантируя высокий уровень прочности. Причем такое затвердевание не должно сопровождаться какой-либо усадкой огнеупорной массы.

Типовыми видами связующих, которые до настоящего времени используют для изготовления безводных лёточных масс, являются каменноугольные смола и пек, относящиеся к I и II классам опасности и имеющие в своих составах канцерогенные вещества (бензо(а)пирены, с индексом риска R45 "вызывает рак"). В связи с канцерогенностью каменноугольной смолы за рубежом в 1980-е годы был введен запрет на ее применение. Однако начиная с 2001 г., возобновили исследования по применению каменноугольной смолы в качестве связки для лёточных масс на некоторых заводах в Японии и в Запад-

ной Европе, в связи со снижением стойкости околелётчных проемов. Для этих целей стали использовать каменноугольную смолу после глубокой вакуумной очистки от ароматических углеводородов, благодаря чему содержание бензапирена в ней значительно снизилось по сравнению с исходной смолой (100...200 мг/кг) и сейчас составляет менее 10 мг/кг.

Лётчные массы с использованием этих связующих образуют медленно твердеющие массы, которые применяют для заделки лётков больших доменных печей, оборудованных 2...4 лётками. Их преимущества [2]:

- позволяют очень быстро нарастить лётку, восстановить футеровку околелётчного пространства;

- обеспечивают глубокое проникновение в повреждения боковой поверхности канала лётки и в дальнейшем — заполнение ближайших швов в кладке околелётчного пространства;

- наличие высокого содержания каменноугольной смолы обеспечивает хорошее сродство к материалам, из которых выполняют каналы лётки: высокоглиноземистые шамотные углеродистые огнеупоры;

- обеспечивают достаточно плоский и пологий нарост (гриб) на рабочей поверхности горна, что не создает гидравлических сопротивлений потоку расплава;

- масса достаточно долго сохраняет пластичность в цилиндре пушки, в результате чего отпадает необходимость частой ее перезарядки, и, как следствие, меньший расход массы;

- повышенный срок хранения.

Недостатки:

- не удовлетворяют допустимым санитарным нормам при хранении и использовании;

- нельзя применять при возникновении необходимости работы на одну лётку.

За рубежом лётчные массы на каменноугольной смоле заменяют массами на полимерных связках, в основном состоящих из синтетических жидких смол двух типов (новолак и резол) и различных композитов типа "Raухolit TM" [3]. Из них наиболее широко опробованы фенолформальдегидные смолы с большим коксовым остатком и минимальным содержанием свободного фенола (не более 5 %, желательно до 1 %) или формальдегида с добавкой отвердителя или без добавки. В массы без добавки отвердителя добавляют металлические порошки алюминия, магния, кремния, способству-

ющие образованию карбидов, повышающих шлакоустойчивость массы и прочность при высокой температуре. Сегодня в Европе трудно найти доменные печи, на которых не применяют подобные технологии. Тем не менее эти составы лётчных масс не так безвредны для здоровья и окружающей среды. Фенол и формальдегид в свободном состоянии являются опасными в зависимости от их концентрации.

Компания CALDERYS (Германия) [4] провела исследования, направленные на определение уровня токсичности связующих и углеродистых добавок. В составе лётчных масс выделяют 16 основных вредных токсичных веществ, представляющих собой *полициклические ароматические углеводороды* (ПАУ). Некоторые из них, такие как бензапирен, канцерогенны. Совместно со своими основными клиентами компания CALDERYS провела анализ более чем 35 различных видов лётчных масс, присутствующих на рынке, в том числе и своих продуктов. Содержание вредных химических веществ у различных масс значительно отличалось в зависимости от состава материала и вида связующего (табл. 1).

Из приведенных выше данных видно, насколько большой может быть разница в содержании вредных веществ у продуктов разных производителей. Это означает, что термин "экологически чистые" лётчные массы, который используют повсеместно, не всегда оправдывает свое название, так как уровень этой чистоты у различных продуктов разный.

В настоящее время производство экологически чистых лётчных масс путем снижения ПАУ является главной задачей зарубежных компаний, например, CALDERYS, KOPUH VP (Словения), LAFARGE REFRACTORIES (Франция). Компания Seven Refractories (Словения) — лидер в области исследований и разработки экологически чистых материалов в данной отрасли. Она выбирает альтернативные технические пути для получения подходящих свойств системы связующего, чтобы гарантировать наименьшую концентрацию потенциально канцерогенных соединений, таких как ПАУ.

Введение в действие Природоохранной системы ИСО 14000 стимулирует отечественные предприятия к замене материалов, содержащих вредные вещества, экологически чистыми, даже если это сопряжено с увеличением затрат на материально-техническое снабжение.

1. ПАУ в составе лётчных масс, мкг/кг

ПАУ	Поставщики				Фирма CALDERYS (разные связующие)		
	1	2	3	4			
Нафталин	24,9	101,0	16,0	3,0	<0,5	<0,5	<0,5
Аценафтилен	<0,01	5,4	<1	<1			
Аценафтен	40,0	10,2	7,0	6,0	1,4	<0,5	<0,5
Флуорен	55,0	26,3	8,0	7,0			
Фенантрен	244,0	288,0	40,0	38,0	7,5	0,9	1,1
Антрацен	4,9	9,3	6,0	5,0	<0,5	<0,5	<0,5
Пирен	5,6	32,1	11,0	9,0	7,0	4,9	3,2
Бензо(к)флуорантен	21,4	1,9	1,0	1,0	—	—	—
Бензо(а)антрацен	11,4	0,9		<1	<0,5	<0,5	<0,5
Флуорантен	34,7	32,5	18,0	18,0	5,6	1,6	1,0
Индено(123, d)пирен	55,7	0,5	2,0	1,0	<5,0	<5,0	<5,0
Бензо(б)флуорантен	37,9	5,3	1,0	<1	0,5	0,6	0,8
Хризен	91,7	86,8			<0,5	<0,5	2,0
Бензо(а)пирен	52,7	3,5		1,0	<0,5	1,0	<0,5
Бензо(ghi)перилен	87,1	1,9	2,0	2,0	3,7	4,0	3,6
Бензо(ah)антрацен	26,6	1,0	1,0	1,0	<0,5	<0,5	<0,5
Сумма	793,6	606,5	116,5	94,0	29,2	15,6	13,9

В связи с этим лётчные массы на полимерной связке находят применение и в отечественной практике, для их изготовления чаще всего используют связующие, приведенные в табл. 2. Каменноугольный пек заменяют другими, менее экологически вредными углеродистыми связующими, например, продуктом Carbores (производитель фирма Ruetgers-Gruppe, Германия), в котором содержание бензо(а)пирена менее 500 ppm (1 ppm = 1 мг/кг = $1 \cdot 10^3$ мкг/кг).

Основу связующего марки СБ-М составляют полимеры — 95...97 % и их полимеризация протекает при температуре 250...500 °С. Этот связующий компонент представляет собой вязкую жидкость темно-коричневого цвета и имеет следующий элементный состав, %: углерод — 85; водород — 8; кислород — 7. Связующее не содержит канцерогенных веществ и относится к IV классу опасности, что в настоящее время, учитывая экологическую безопасность, очень актуально. С использованием этого связующего

2. Синтетические связующие для лётчных масс

Связующее	Характеристика	Производитель
Эгида-5	Фенолформальдегидная смола резольного типа	ПАО «Уралхимпласт», г. Нижний Тагил
ФНР-1 (ТУ 6-05751768-51—94)	Фенолформальдегидная смола	
СБ-М (ТУ У 24.6-00190443-145—2002)	Продукт нефтехимического синтеза	ООО НПО «Синтоп», Украина
Премикс УЛМ (ТУ 2311-006-39903592—2004)	Смесь фенольной смолы и нефтяных кубовых остатков	ООО "ОКСИМА", г. Екатеринбург

компонента в Украине разработано и освоено производство современной безводной лёточной массы. По технико-эксплуатационным показателям состав лёточной массы находится на уровне лучших мировых аналогов при существенно сниженной стоимости.

Российская компания ОАО "Динур" — основной разработчик и поставщик лёточных масс на полимерной связке [5], разработала лёточную массу ВГМЭ-307, обеспечивающую стабильное состояние лётки, ровный ход выпусков и удельный расход 0,30...0,40 кг/т чугуна. Для производства массы ВГМЭ-307 применена органо-керамическая связка, причем органическая составляющая связки комбинированная и содержит синтетические и вяжущие смолы природного типа, твердеющие при высокой температуре с различной скоростью и в разные временные интервалы. Для успешной работы лёточной массы химический, гранулометрический и количественный составы компонентов массы подбирают с учетом температур начала твердения каждого связующего. Эта отечественная лёточная масса по эксплуатационным

характеристикам не уступает импортным и имеет близкие к ним физико-химические показатели (табл. 3).

В процессе осуществления доменного процесса лёточная масса, закачанная в выпускное отверстие, контактирует с жидким чугуном и шлаком при повышенных температурах и высоком давлении дутья, которое достигает 400 кПа [6]. После нагнетания массы в канал из связки удаляются летучие вещества и при этом в результате ее полимеризации и карбонизации образуется твердая структура. Важно, чтобы при затвердевании и карбонизации образовалась плотная структура без трещин, это определяет срок службы и стабильность лёточной массы.

Материалы на каменноугольной и пековых связках термопластичны, это означает, что затвердевание их не наступит без прогрева до 600 °С. Коксование полимерных лёточных масс (термококующие массы) начинается при температуре 130 °С, где формируется аморфная фаза, значительно уплотняющая массу. Дальнейшее коксование при температуре выше 600 °С при-

3. Характеристика массы ВГМЭ-307 и лёточных масс производства Германии и Франции

Показатель	Масса ВГМЭ-307 (ОАО "Динур")	Зарубежные лёточные массы	
		Германия	Франция
Тип	Лёточная масса на органокерамической связке		
Основные компоненты	Корунд, боксит, карбид кремния, углерод	Боксит, карбид кремния, углерод	Кварц, боксит, карбид кремния
Размер зерен, мм	<3	<3	<1
Состояние поставки	Паста		
Упаковка	Брикеты в полиэтиленовой упаковке		
Срок хранения в сухом месте при 20 °С, мес	6		
Способ применения	Экструзия		
Кажущаяся плотность в сыром виде, кг/м ³	2440	2200	2270
Содержание летучих веществ, %	10...11,5	13	10,5
Химический состав, %:			
Al ₂ O ₃	>50	47,4	50
SiO ₂	13	22,2	31
SiC	9	10,5	14
C	>15	19,7	—
Физические свойства после восстановительного обжига при 800 °С:			
кажущаяся плотность, кг/м ³	2200	1920	2000
открытая пористость, %	28...32	28	<30
предел прочности при сжатии, МПа	5...12	10...14	8

водит к образованию трехмерного углеродистого соединения, которое прочнее графитоуглеродистого, образуемого в результате сгорания (окисления) каменноугольной смолы и пека. Источником их окисления является кислород, содержащийся в доменном шлаке и, частично, в чугуне.

Процессы окисления каменноугольной смолы и пека исследованы на приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы NETZSCH, предназначенного для проведения при одном измерении образца одновременно *дифференциальной сканирующей калориметрии* (ДСК) и *термогравиметрического анализа* (ТГ). При измерении автоматически фиксировались кривые изменения массы (ТГ) и кривые изменения теплового потока (ДСК). Исследования проведены в лаборатории в условиях непрерывного нагрева образцов до температуры 1000 °С в атмосфере воздуха со скоростью 20 °С/мин.

На кривой ДСК (рис. 1) лёточной массы на каменноугольной смоле отсутствуют термические эффекты до температуры 300 °С. При этом на кривой ТГ в диапазоне температур 120...300 °С фиксировали потерю массы, связанную с испарением легколетучей части смолы (6,34 %). Далее свыше 300 °С наблюдали два экзотермических эффекта (461 и 520 °С) в диапазоне температур 300...600 °С, соответствующие окислению каменноугольной смолы, которое продолжалось до 570 °С. Процессы окисления смолы сопровождались потерями массы, которые зафиксированы на кривой ТГ и составляют 13,5 %. Экзоэффект с максимумом пика при 759 °С соответствует выгоранию углерода

в количестве 15 %, введенного в лёточную массу, вероятно, в виде такого материала, как кокс, для придания ей высокой теплопроводности и устойчивости к термоциклическим нагрузкам.

Часть смолы при нагреве улетучивается и создает пористость, поэтому для получения плотной структуры считают целесообразным насколько возможно уменьшить добавку смолы. Установлено, что величина добавки смолы, необходимой для обеспечения заполняемости, составляет 14...20 % мас. Это связано с различной абсорбционной способностью углеродсодержащего сырья (сажи, кокса, графита и т.п.) к смоле, используемой при приготовлении лёточных масс [7].

Таким образом, результаты исследования показали, что содержание каменноугольной смолы в лёточной массе составляет около 20 % и процессы ее окисления заканчиваются при 570 °С, т.е. при этой температуре масса затвердевает и обеспечивает необходимый уровень пластичности.

На кривой ДСК (рис. 2) пека до температуры 600 °С отмечены два незначительных экзотермических эффекта с максимумами пика при 404 и 551 °С, характерных для процессов конденсации и полимеризации пека. Потери массы, связанные с этими процессами, составляют около 40 %. При температуре свыше 600 °С начинает выгорать углерод и его окисление заканчивается при 850 °С.

Результаты сравнительного анализа обеих проб подтвердили, что коксование каменноугольной смолы и пека заканчивается до тем-

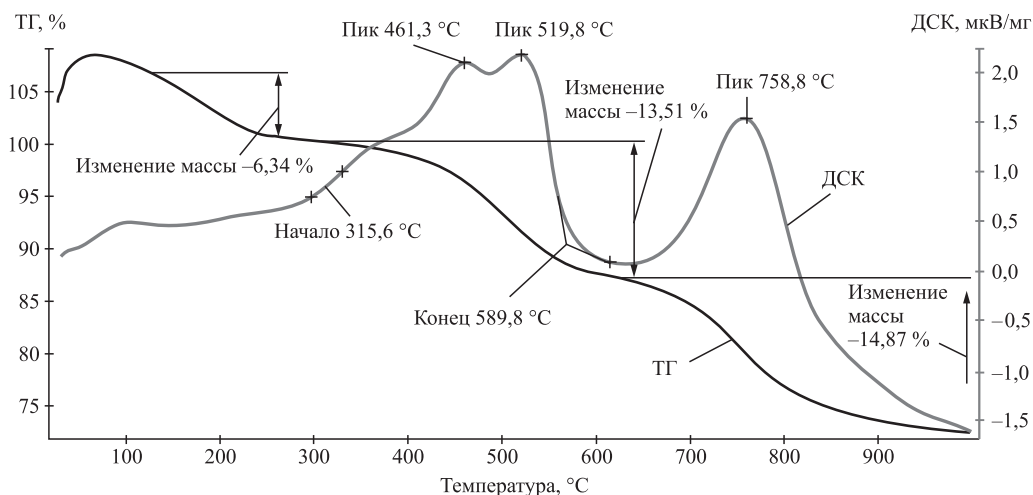


Рис. 1. Термограмма лёточной массы на каменноугольной смоле

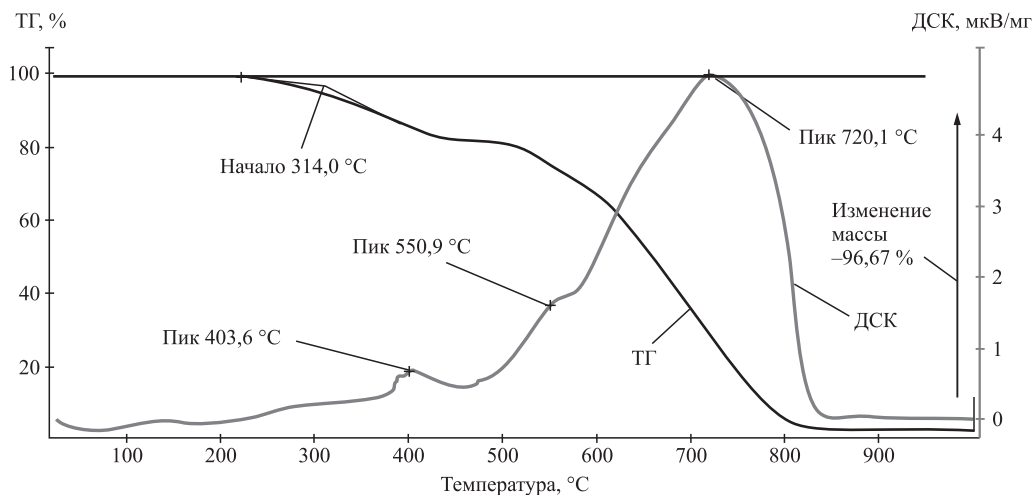


Рис. 2. Термограмма пека

температуры 600 °С, что особенно важно для термопластичных масс.

Полученные результаты исследований позволяют надежнее прогнозировать изменение свойств лёточной массы в процессе эксплуатации, исходя из применяемых связующих и углеродсодержащих компонентов.

Заключение. Проведен подробный анализ существующих лёточных масс, применяемых на различных металлургических предприятиях нашей страны и за рубежом.

Показано, что одним из главных требований к массам является их экологичность. Для производства лёточных масс взамен вредной каменноугольной смолы используют синтетические смолы (фенолформальдегидные резольные и новолачные). Установлено, что окисление каменноугольной смолы и пека протекает до температуры 600 °С, что особенно важно для медленно твердеющих лёточных масс, применяемых для больших доменных печей, оборудованных 2...4 лётками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Современные** лёточные массы для доменных печей / Э.М. Манашева, В.Г. Дружков, В.А. Шаган,

И.В. Макарова, С.А. Байченко // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 2 (17). С. 11–13.

2. **Бочаров А.И.** Огнеупоры для доменного производства // Огнеупоры и техническая керамика. 2009. № 4–5. С. 23–26.

3. **Штигер Д., Якоб Х.К.** CARBORES — новая связующая система для огнеупоров // Новые огнеупоры. 2004. № 4. С. 140–142.

4. **Экологически чистые** лёточные массы на полимерных связках: высокие эксплуатационные качества и низкое содержание ПАУ / М. Гондолф, С. Ламонтре, М. Шрам, Р.А. Чеглов // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 7. С. 45–50.

5. **Гороховский А.М., Беклемышев Е.В.** Неформованные огнеупоры производства ОАО "Динур" // Новые огнеупоры. 2014. № 11. С. 15–21.

6. **Microstructure** of Tap Hole Mix in Contact with Slag and Pig Iron / Masakazu Hda, Yasunobu Torttani and Tsuyoshi Okamoto // Journal of the Technical Association of Refractories. 2006. Vol. 26. No. 2. P. 107–111.

7. **Влияние** углеродистого сырья на свойства лёточных масс // Новости черной металлургии за рубежом. 2007. № 2. С. 102–104.

*Константин Николаевич Вдовин, д-р техн. наук,
vdovin@magtu.ru;*

*Ксения Григорьевна Пивоварова, канд. техн. наук;
Николай Александрович Феоктистов, канд. техн. наук*

А.А. Мосин (ООО "Курганстальмост"),
В.А. Ерофеев (Тульский государственный университет),
М.А. Шолохов, А.М. Фивейский
(Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

Оптимизация двухэлектродной сварки под флюсом угловых швов мостовых металлоконструкций

Для решения проблемы сварки угловых швов с катетом в угол за один проход больше 6...8 мм из-за стекания металла с вертикальной стенки предложено использовать двухэлектродную сварку. Компьютерный анализ этого процесса показал, что приемлемое формирование углового шва можно обеспечить оптимизацией параметров процесса сварки, включая позиционирование электродов относительно шва. Благодаря этому можно получить катет швов при сварке в угол до 12 мм. Однако большие катеты угловых швов при двухдуговой сварке под флюсом можно получить только в том случае, если расстояние между дугами достаточно для формирования отдельных сварочных ванн, причем одна из дуг будет смещена на вертикальную стенку на половину катета.

Ключевые слова: угловой шов; компьютерный анализ; двухэлектродная автоматическая сварка под флюсом; формирование шва.

To solve the problem of welding of fillet welds with leg in one pass of more than 6...8 mm due to the draining of metal from vertical wall it is proposed to use two-electrode welding. The computer analysis of this process showed that acceptable formation of the fillet weld can be achieved by optimizing of the welding process parameters, including the positioning of electrodes relative to the weld. Due to this, it is possible to provide leg of welds upon welding up to 12 mm. However, large legs of fillet welds in twin-arc submerged arc welding can be obtained only if the distance between the arcs is sufficient in order to form separate weld pools, and one of the arcs will be shifted by leg half on the vertical wall.

Keywords: fillet weld; computer analysis; two-electrode submerged arc welding; weld formation.

Введение. Традиционные методы строительства мостов предусматривают укрупненную сборку металлоконструкций непосредственно на месте строительства, с поставкой туда необходимых объемных фрагментов. При этом стремятся к тому, чтобы объемы сварочных работ на месте строительства были минимальными, а основной объем сварочных работ был сосредоточен на заводах мостовых конструкций [1]. Сварка на таких предприятиях протяженных угловых швов составляет от 40 до 70 % от общего объема сварочных работ. Поэтому сварка протяженных швов, в том числе и под флюсом, легко поддается автоматизации [2]. При этом бездефектное воспроизведение максимально возможного катета за один проход при сварке угловых швов является основным резервом повышения производительности труда [3].

Хорошо известны [4] благоприятные условия формирования угловых швов при сварке в лодочку. Однако при сварке больших и тяжелых металлоконструкций зачастую невозможно ис-

пользование кантователей, необходимых для сварки в лодочку, поэтому абсолютное большинство швов сваривают в угол. Экспериментально установлено, что гарантированно получать при однопроходной сварке под флюсом протяженные швы требуемого качества можно только с катетом 6...7 мм. При больших катетах приемлемое формирование шва при сварке в один проход получить не удастся вследствие стекания металла с вертикальной стенки (рис. 1).

Таким образом, сварка однопроходных швов в угол является сдерживающим фактором увеличения объема выпуска продукции заводами мостовых металлоконструкций.

Возможное решение проблемы. Простейшим известным вариантом повышения производительности сварки является двухэлектродная сварка, или так называемая сварка расщепленным электродом, позволяющая увеличивать катет угловых швов при сварке в угол с удовлетворительным качеством их формирования за

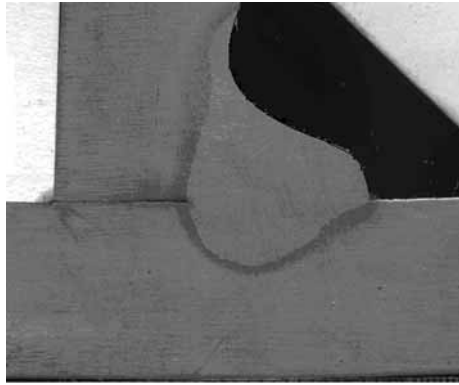


Рис. 1. Формирование углового шва при сварке под флюсом листов из стали 09Г2С толщиной 20 мм при токе 900 А и скорости сварки 5 мм/с

счет сложного электродинамического воздействия на сварочную ванну попеременно действующих дуг [5]. Однако влияние целого ряда параметров на качество формирования швов до сих пор недостаточно изучено. В этой связи вопросы оптимизации параметров двухэлектродной сварки под флюсом угловых швов мостовых металлоконструкций нуждаются в дополнительном изучении.

Цель работы — рассмотрение вопросов оптимизации параметров двухэлектродной сварки в угол швов с увеличенным катетом для повышения производительности процессов сварки мостовых металлоконструкций в цеховых условиях.

В работе [6] установлено, что катет формируемых швов при сварке в угол можно увеличить при определенном расположении пары электродов (расстояния между ними, угла поворота, положения в разделке) относительно стыка (рис. 2 и 3).

Так как зависимость между параметрами процесса сварки и геометрией сварного шва

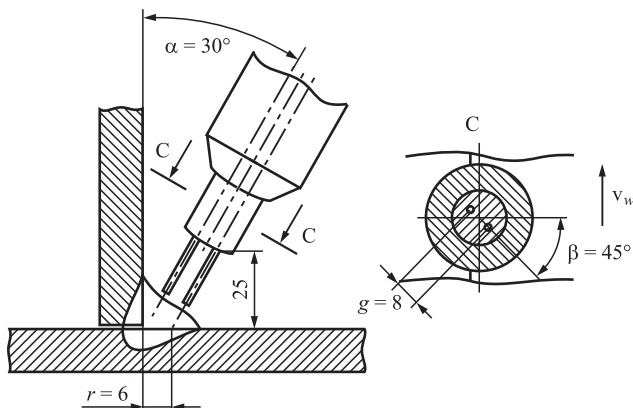


Рис. 2. Схема расположения горелки относительно заготовок, поперечное сечение мундштука горелки и расположения сварочных проволок

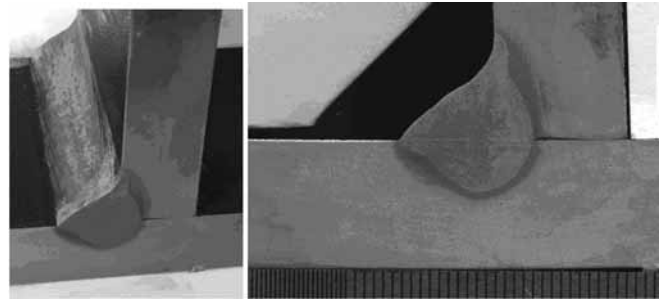


Рис. 3. Макрошлиф сварного соединения, полученного при сварке стали 10ХСНД толщиной 14 мм при токе дуги 850 А, напряжении 29 В, скорости сварки 35 м/ч и расположении сварочных проволок согласно рис. 2

не явно выражена, то планируемые результаты обычно достигаются в ходе экспериментальных исследований.

Методика исследования. Исследование влияния положения электродов на возможность увеличения катета углового шва также затруднено необходимостью проведения значительного объема очень сложных в осуществлении экспериментальных исследований. Вместе с тем накоплен значительный опыт проведения различных исследований сложных процессов и явлений при дуговой сварке с использованием методов физико-математического моделирования [7–9].

Однако проведенный анализ этих и других работ показал, что изложенные там методы не учитывают влияния положения электродов на форму катета шва и производительность процесса однопроводной двухэлектродной сварки. Поэтому инженерную методику расчета параметров режима двухдуговой сварки угловых швов, изложенную в работе [10], целесообразно дополнить виртуальным анализом условий формирования угловых швов при различных вариантах расположения электродов в процессе двухэлектродной сварки. Такой анализ возможен только предприятиям, обладающим значимым инновационным потенциалом, а их специалисты используют современные методы исследований [11–13].

Для выполнения этого анализа использовали разработанную ранее физико-математическую модель формирования шва при сварке под флюсом, учитывающую основные параметры процесса, определяющие формирование угловых швов.

Модель учитывает, что дуга горит в парогазовой полости, возникающей вследствие плавления и испарения флюса. Учтено, что теплота дуг распространяется в сложном простран-

стве, включающем металл стыка в твердом и жидком состояниях, флюс в порошковом, расплавленном и переплавленном состояниях. Помимо молекулярного теплопереноса в модели учтен перенос теплоты парами флюса в пределах газодуговой полости, а также перенос каплями электродного металла, а также определяется расположение дуги в указанной полости.

Формы поверхности сварочной ванны и шва определяются расчетом кривизны этой поверхности, уравнивающей гравитационное давление, определяемое пространственным положением выполнения сварки, а также электродинамическое давление дуги и внутреннее давление в расплаве. Значение внутреннего давления определяется из условия баланса масс наплавленного и электродного металла.

Система уравнений, описывающая перечисленные явления, решается численными методами. При компьютерном решении рассчитывается распределение теплоты дуги в металле и флюсе, определяются расположение сварочной ванны и форма ее поверхности, которая фиксируется на фронте кристаллизации, что определяет формирование шва.

Для воспроизведения процесса двухэлектродной сварки в известную модель добавили описание пространственного положения расщепленного электрода относительно стыка и уточнили распределение теплового потока и давления сдвоенной дуги. Соответственно, в модель ввели дополнительные параметры: расстояние g между электродами, угол β между плоскостью электродов и направлением сварки и расстояние r от электрода до средней линии стыка (см. рис. 2). Учли также влияние угла α наклона горелки относительно стыка.

На рис. 4 (см. обложку) показан результат компьютерного моделирования формирования сварочной ванны и шва при двухэлектродной сварке углового соединения листов из стали 10ХСНД толщиной 14 мм.

При компьютерном моделировании учитывали следующие характеристики процесса сварки: электродная проволока Св-08ГА диаметром 2 мм; скорость подачи 23 мм/с; вылет электродов 25 мм; угол наклона 45° к горизонту. Электроды расположены на расстоянии 8 мм друг от друга, перпендикулярно плоскости симметрии стыка и направлению сварки. Режим сварки: скорость сварки 10 мм/с; общий ток расщепленного электрода 850 А; напряжение на дугах 29 В. В результате моделирования определено распределение температуры в стыке, электродах и флюсе.

Моделирование показало, что при относительно близком расстоянии между электродами формируются общая для обеих дуг парогазовая полость и единая сварочная ванна. Длина дуги около 3 мм, общая мощность тепловыделения в столбе дуги 12,7 кВт. Мощность тепловыделения в катодном пятне 6,8 кВт, мощность, переносимая каплями электродного металла, — 5,1 кВт. Ширина сварочной ванны 16,8 мм, глубина 10,5 мм, длина 67 мм. Однако при дальнейшем форсировании режима наблюдается стекание расплава сварочной ванны с вертикальной стенки на горизонтальную полку вследствие гравитационного воздействия.

Выполнение исследования. Для указанного варианта сварки исследовали влияние угла β , определяющего расположение электродов относительно направления сварки. Параметры ориентации электродов относительно стыка: $\alpha = 45^\circ$; $g = 8$ мм; $r = -3$ мм. Результат моделирования показан на рис. 5.

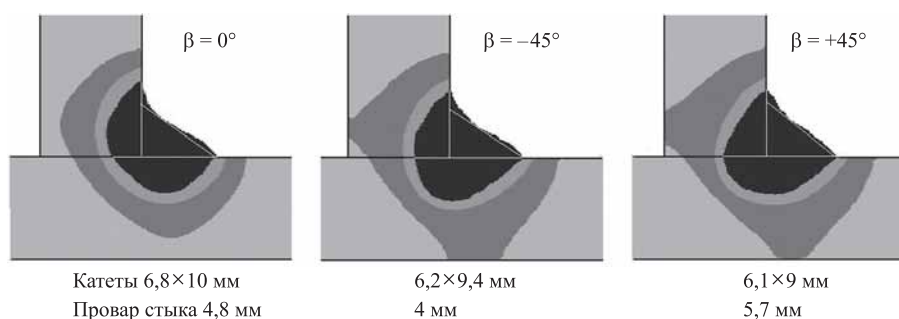


Рис. 5. Результаты моделирования при различных углах β расположения электродов относительно стыка

При расположении электродов на линии, перпендикулярном направлению сварки, формируется широкий шов с заметным стеканием расплава с вертикальной стенки. По этой причине несущий размер катета на этой стенке заметно уменьшается (до 6,8 мм) по отношению к катету на горизонтальной полке (10 мм). Провар стыка между стенкой и полкой (4,8 мм) не достигает половины толщины стенки.

При смещении дуги на стенке вперед ($\beta = -45^\circ$) и, соответственно, отставании дуги на полке ширина и катеты шва уменьшаются, а глубина проплавления увеличивается, что объясняется приближением дуг к плоскости симметрии стыка. Однако увеличивается только провар полки, а провар стыка между стенкой и полкой уменьшается (4 мм). Стеkanie расплава менее заметно по сравнению с симметричным расположением электродов, различие катетов также немного уменьшается.

При смещении дуги на стенке назад ($\beta = +45^\circ$), при котором дуга на стенке отстает от дуги на полке, стекание расплава и различие катетов заметно уменьшаются. Существенно увеличивается провар стыка (5,7 мм).

Вариант расположения с отставанием дуги на стенке обеспечивает лучшее формирование шва, поэтому дальнейшее исследование влияния параметров выполнили именно для этого варианта. Так как катеты шва для данной толщины недостаточны, то увеличили расстояние между дугами ($g = 12$ мм) (рис. 6).

Соответственно, увеличились ширина шва и катеты, но стало заметнее стекание металла с вертикальной стенки и различие катетов (6,5 и 9,0 мм). Существенно уменьшился провар стыка (4,7 мм). На следующем шаге изменили общее расположение электродов, направив их на стенку и непосредственно в стык ($r = 0$). Катет на стенке сильно увеличился (10,5 мм), но на полке стал недопустимо мал (3,8 мм). При

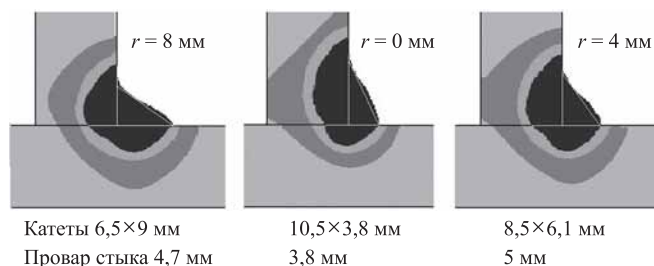


Рис. 6. Результаты моделирования при различных смещениях r электродов от стыка и углах α наклона горелки

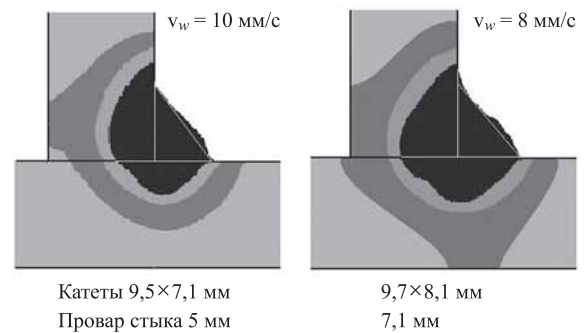


Рис. 7. Результаты моделирования при смещении $r = 4$ мм, угле наклона горелки $\alpha = 30^\circ$ и различных скоростях сварки

умеренном смещении ($r = 4$ мм) катеты сблизились (8,5 и 6,1 мм). Следующим шагом было изменение угла α наклона горелки, который уменьшили с 45 до 30° (рис. 7).

Изменение угла наклона горелки увеличило катеты до значений 9,5 мм на стенке и 7,1 мм на полке. Проплавление стыка при этом не изменилось. Для увеличения размера шва скорость сварки уменьшили с 10 до 8 мм/с. В результате площадь сечения шва заметно возросла (см. рис. 7). Особенно заметно увеличение проплавления стыка (7,1 мм), которое превысило половину толщины стенки. Полученное сечение шва обеспечивает прочность соединения, равную прочности свариваемых листов.

Для проверки адекватности моделирования экспериментальных данных работы [6] воспроизвели процесс сварки расщепленным электродом при разных значениях угла β , при расстоянии между электродами $g = 6$ мм и токе дуги 650 А. Результат моделирования и соответствующие им макрошлифы показаны на рис. 8.

Полученные результаты подтвердили, что результаты моделирования адекватно соответствуют ранее полученным экспериментальным данным.

Обсуждение результатов. Выполненный анализ показал, что стекание металла при сварке в угол может быть частично преодолено использованием двухэлектродной сварки, что позволяет увеличить размеры катетов угловых швов при сварке в один проход. Для этого необходимо, чтобы расстояние между электродами было приблизительно равно требуемому размеру катета, причем электроды должны быть повернуты на угол 45° так, чтобы дуга на вертикальной стенке отставала от дуги на полке, причем центр этой дуги отстоял от стыка приблизительно на половину требуемого катета.

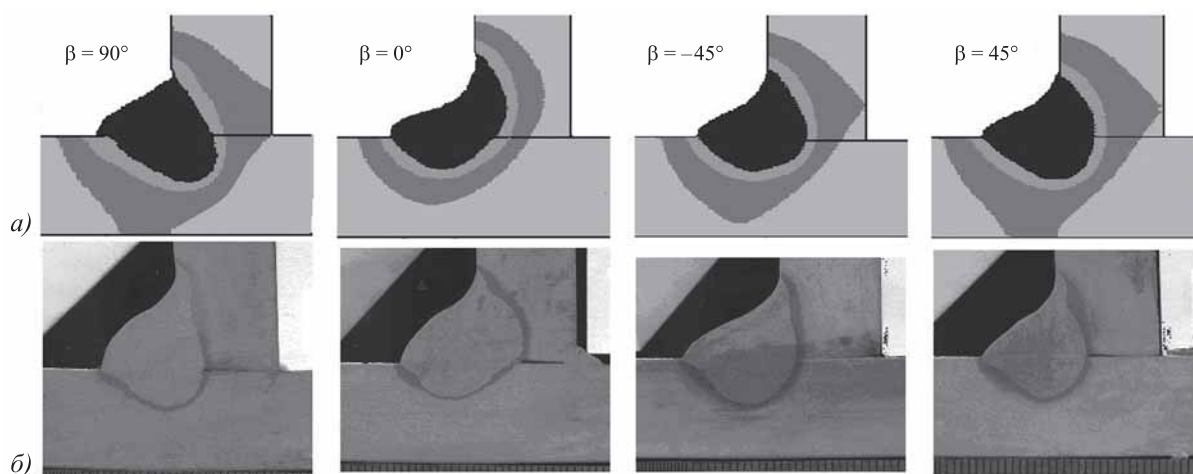


Рис. 8. Влияние угла β между плоскостью электродов и направлением сварки:

a — результаты моделирования; *б* — фактически полученные результаты (макрошлифы) сварки

Оптимально иметь наклон горелки около 30° от вертикали. Ток дуги и скорость необходимо подобрать исходя из получения необходимого проплавления стенки.

Физическое объяснение эффективности такого решения заключается в том, что смещение дуги на стенке приводит к созданию сварочной ванны неравновесной формы (рис. 9, см. обложку).

Часть сварочной ванны, создаваемая дугой на полке, короче части, создаваемой дугой на стенке, так как теплоотвод в полке значительно, чем в стенке. Кроме того, дуга на стенке плавит металл, подогретый верхней дугой на полке. При указанном расположении электродов формируется несимметричная сварочная ванна, окончание которой сильно смещено на стенку. Стеkanie расплава со стенки на полку ограничено нижней границей ванны, соответственно окончание стекания и кристаллизации металла смещено по направлению к стенке. Это обстоятельство улучшает формирование поверхности шва, уменьшая мениск у стенки и наплыв на полке. Уменьшение мениска у стенки и наплыва на полке при смещении дуги на стенке объясняется несимметричным процессом кристаллизации металла, протекающим преимущественно от полки к стенке.

Однако, несмотря на доказанную возможность увеличения катета шва при двухэлектродной сварке в угол до 12 мм, дальнейшее увеличение катета при однопроходной сварке расщепленным электродом имеет ограничения по высокой вероятности перетекания металла общей сварочной ванны большого объема в нижнюю часть шва. Поэтому при попытке

получить катеты очень большого размера масса сварочной ванны становится естественным ограничителем, а капиллярные силы, препятствующие появлению менисков, подрезов и наплывов, становятся недостаточными для удовлетворительного формирования шва.

Таким образом, для сварки в один проход швов с катетом больше 12 мм целесообразно использовать многодуговые способы сварки, с формированием швов в отдельные сварочные ванны. Такая сварка формирует шов, как при многопроходной сварке, но энергетически она более эффективна, так как последующие дуги плавят уже подогретый металл. С учетом значимости подбора и использования подходящего процесса сварки для изготовления металлоконструкций в северном исполнении [14], представленные результаты моделирования процесса двухэлектродной сварки под флюсом угловых швов с использованием адекватной физико-математической модели, позволят решать и другие задачи компетентного проектирования технологических процессов сварки мостовых металлоконструкций.

Выводы

1. Трудоемкость изготовления элементов мостовых конструкций в значительной мере определяется трудоемкостью сварки. Рациональный способ повышения производительности — использование автоматической двухэлектродной сварки под флюсом. Проблемой является определение параметров, при которых формируется шов с повышенным размером катетов без подрезов и наплывов.

2. Для оптимизации технологии методами компьютерного анализа использована физико-математическая модель формообразования угловых швов при сварке под флюсом, основой которой является система уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны, в которой формирование дуговой каверны определено по изотерме кипения флюса под действием излучения столба дуги, учтены теплоперенос парами флюса внутри дуговой каверны, а также влияние пространственного положения на формирование сварочной ванны. Модель дополнена соотношениями, учитывающими воздействие двух дуг и их расположениями относительно стыка.

3. Моделирование показало, что при выполнении сварки углового шва в угол можно обеспечить удовлетворительное формирование шва с катетом до 12 мм при определенном расположении расщепленного электрода относительно стыка, при котором дуга на стенке отстает от дуги на полке. Для стальных листов толщиной 14 мм оптимально расстояние между электродами 12 мм, угол поворота электродов относительно направления сварки 45° , смещение электрода от линии стыка 4 мм, угол наклона горелки 30° .

4. Уменьшение мениска у стенки и наплыва на полке при смещении дуги на стенке объяснено несимметричным формированием ванны, при котором кристаллизация металла происходит преимущественно в направлении от полки к стенке.

5. При сварке угловых швов в угол в один проход швов с катетом больше 12 мм целесообразно использовать многодуговые способы сварки с формированием швов в отдельные сварочные ванны. Такая сварка формирует шов, как при многопроходной сварке, но энергетически она более эффективна, так как последующие дуги плавят уже подогретый металл.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колоколов Н.М., Вейнблат Б.Н. Строительство мостов. М.: Транспорт, 1971. 525 с.
2. Патон Б.Е. Проблемы комплексной автоматизации сварочного производства // Автоматическая сварка. 1981. № 1. С. 3—9.
3. Мосин А.А. Возможности повышения производительности сварки протяженных угловых швов

мостовых металлоконструкций (обзор) // Сварка и диагностика. 2020. № 1. С. 50—54.

4. Зайцев Н.Л. Совершенствование методики расчета размеров угловых швов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Металлургия". 2015. Т. 15. № 1. С. 48—52.

5. СТО-ГК "Трансстрой"-012—2007. Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление. М.: Трансстройиздат, 2007. 174 с.

6. Research on technological capabilities of double-electrode welding of long fillet welds / A. Fiveyskiy, A. Mosin, S. Zverev, I. Polevoy // Matec Web of Conferences. The proceedings International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019). 2019. 298 (25). P. 00072. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929800072>.

7. Dhas J.E.R., Kumanan S. Optimization of parameters of submerged arc weld using non conventional techniques // Applied Soft Computing Journal. 2011. Vol. 11. No. 8. P. 5198—5204.

8. Bestard G.A., Alfaro S.C.A. Measurement and estimation of the weld bead geometry in arc welding processes: the last 50 years of development // Journal of Brazilian Society of Mechanical & Engineering. 2018. Vol. 40. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1359-2>.

9. He K., Chen J., Xiao S. Numerical simulation for shaping feature of molten pool in twin-arc submerged arc welding // Open Journal of Applied Sciences. 2012. Vol. 2. No. 1. P. 47—53.

10. Инженерная методика расчета параметров режима двухдуговой сварки угловых швов / А.Ю. Мельников, А.М. Фивейский, М.А. Шолохов, А.Е. Филяков // Сварка и диагностика. 2016. № 3. С. 46—48.

11. Полосков С.С., Желтенков А.В., Сюзева О.В. Инновационная деятельность высокотехнологичных наукоемких предприятий в цифровую эпоху // Материалы междунар. науч.-практ. конф. "Устойчивое и инновационное развитие в цифровую эпоху". М.: МГУ, 2019. С. 358—366.

12. Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using WELD PLANNER / M.S. Sulaiman, Y. Manurung, E. Haruman et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011. Vol. 25. No. 10. P. 2641—2646.

13. Ranjan M., Gunasekaran S., Reghu R. T-Joint weld optimization using Taguchi method // Journal of Chemical and Pharmaceutical. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 1851—1857.

14. Layus P., Kah P., Gezha V. Advanced submerged arc welding processes for Arctic structures and ice-going vessels // Journal of Engineering Manufacture. 2018. Vol. 232. No. 1. P. 114—127.

Алексей Александрович Мосин,
mosinaa@kurganstalmost.ru;

Владимир Александрович Ерофеев, канд. техн. наук;
Михаил Александрович Шолохов, д-р техн. наук;
Андрей Михайлович Фивейский, канд. техн. наук



В.Ю. Лавриненко¹, А.И. Алимов¹, Т.Х. Аюпов², А.И. Изикаева¹
(¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
²АО "Московский машиностроительный завод "Авангард")

Экспериментальные исследования процесса осадки заготовок из титанового сплава ВТ6 бабой молота с наполнителем

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса осадки заготовок из титанового сплава ВТ6 с использованием бабы с наполнителем штамповочного молота мод. М2140 в кузнечном цехе АО "Московский машиностроительный завод "Авангард", показывающие увеличение степени деформации заготовок в 1,12 раза по сравнению с осадкой стандартной бабой молота. Микроструктурный анализ полученных поковок позволил установить отсутствие изменений микроструктуры поковок после осадки бабой молота с наполнителем по сравнению со стандартными условиями осадки.

Ключевые слова: штамповочный молот; баба молота с наполнителем; титановый сплав ВТ6; микроструктура; альфа-фаза.

The results of experimental studies of upsetting of the blanks from VT6 titanium alloy by using filler ram of die-forging hammer M2140 in Moscow plant "Avangard" are presented. The increasing of the deformation degree of blanks by 1.12 times in comparison with standard hammer ram is obtained. The microstructural analysis of the obtained blanks allows to establish the absence of changes in the microstructure of the blank after upsetting by hammer filler ram in comparison with standard upsetting.

Keywords: die-forging hammer; hammer filler ram; VT6 titanium alloy; microstructure; alpha-phase.

В результате промышленной апробации бабы с наполнителем (рис. 1), установленной на штамповочном молоте мод. М2140 с массой падающих частей 1000 кг, и экспериментальной горячей объемной штамповки поковок "угольник" из стали 12Х2НВФА, проведенной ранее в производственных условиях АО "Московский машиностроительный завод "Авангард" [1–5], было установлено уменьшение общего числа ударов молота при использовании бабы молота с наполнителем по сравнению со штамповкой стандартной бабой молота в 1,4 раза при полном соответствии размеров поковок требованиям чертежа.

Проведенный расчет экономической эффективности использования бабы с наполнителем штамповочного молота мод. М2140 с массой падающих частей 1000 кг позволил установить снижение нормы штучного времени на штамповку при исполь-

зовании бабы молота с наполнителем на 11 %; снижение удельного энергопотребления и экономию электроэнергии при использовании бабы молота с наполнителем на 12 % и снижение удельного потребления сжатого воздуха при использовании бабы молота с наполнителем на 11 % [6].

Также была проведена осадка цилиндрических заготовок из титанового сплава ВТ6 (диаметр $D_0 = 80$ мм, высота $H_0 = 66$ мм) стандартной бабой молота (поковка № 1) и бабой молота с наполнителем (поковка № 2) на штамповочном молоте мод. М2140 (масса падающих частей 1000 кг).

Давление в пневматической сети цеха перед осадкой составляло $7,6 \cdot 10^5$ Па (7,6 ат), энергия каждого удара молота — максимальная.

Заготовки нагревали в камерной электропечи ПК 11.16.7-11М до температуры 950 °С в течение 90 мин.

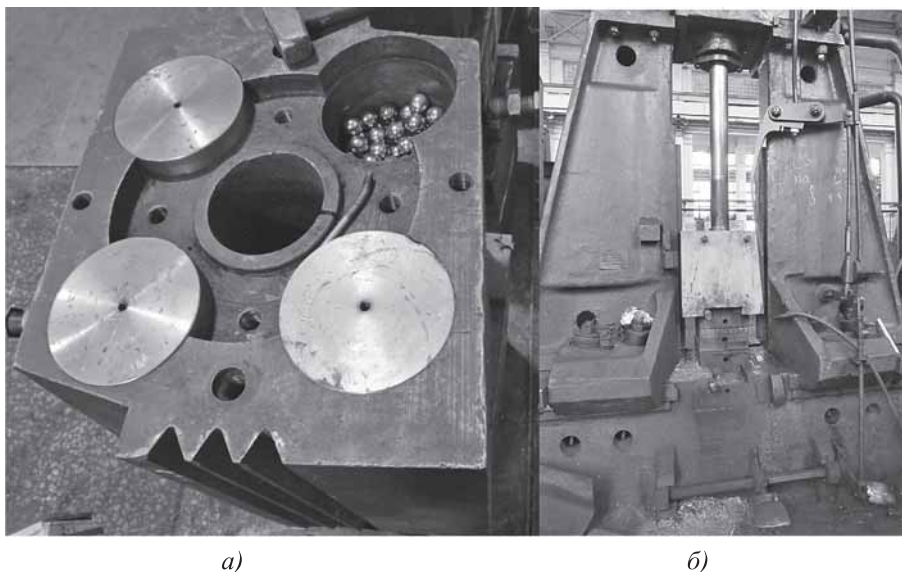


Рис. 1. Баба молота с наполнителем (а) и модернизированный штамповочный молот мод. М2140 (б)

Температуру поверхности заготовки перед осадкой ($920\text{ }^{\circ}\text{C}$) и температуру поверхности поковки после окончания осадки ($740\text{ }^{\circ}\text{C}$) контролировали с помощью пирометра мод. СЕМ DT-8855.

Между ударами молота выдерживали паузу 3 с.

Фотографии поковок после осадки показаны на рис. 2.

В таблице приведены размеры поковок и степень деформации после осадки. При этом

необходимо отметить увеличение степени деформации заготовки при использовании модернизированной бабы молота с наполнителем на 12 % (в 1,12 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой молота.

Далее был проведен микроструктурный анализ образцов, вырезанных из полученных поковок № 1 и № 2, включающий подготовку микрошлифов (заливку, шлифование, полировку,

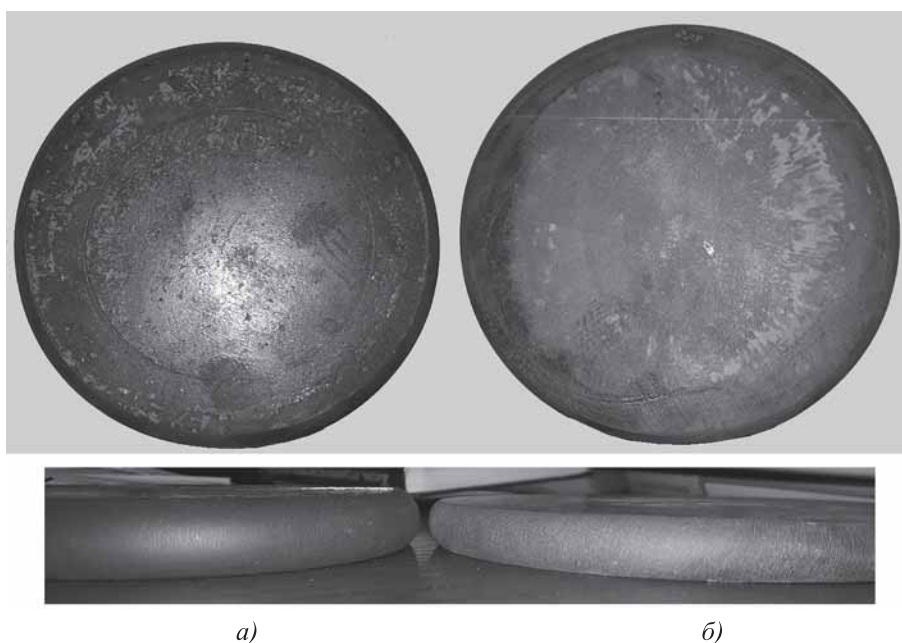


Рис. 2. Поковки после осадки:

а — стандартной бабой молота (поковка № 1); б — бабой молота с наполнителем (поковка № 2)

Размеры поковок и степень деформации после осадки

Номер поковки	Число ударов	Высота поковки	Максимальный размер поковки	Степень деформации
		мм		
1	9	Осадка стандартной бабой молота		
		20,1	151	0,695
2	9	Осадка бабой молота с наполнителем		
		14,7	178	0,777

травление в составе: 10 мл HF; 5 мл HNO₃; 85 мл H₂O) в продольном и поперечном направлениях, позволивший установить, что образцы имеют изотропную микроструктуру и не имеют структурных неоднородностей (рис. 3).

Микроструктуры обоих образцов соответствуют 2–3-му типу 9-типной шкалы двухфазных титановых (α + β)-сплавов в соответствии с инструкцией ПИ 1.2.785–2009. Микроструктура дуплексная, с долей первичной α-фазы 25,4 и 27,4 % у образца № 1 (см. рис. 3, б) и образца № 2 (см. рис. 3, в) соответственно. Средний

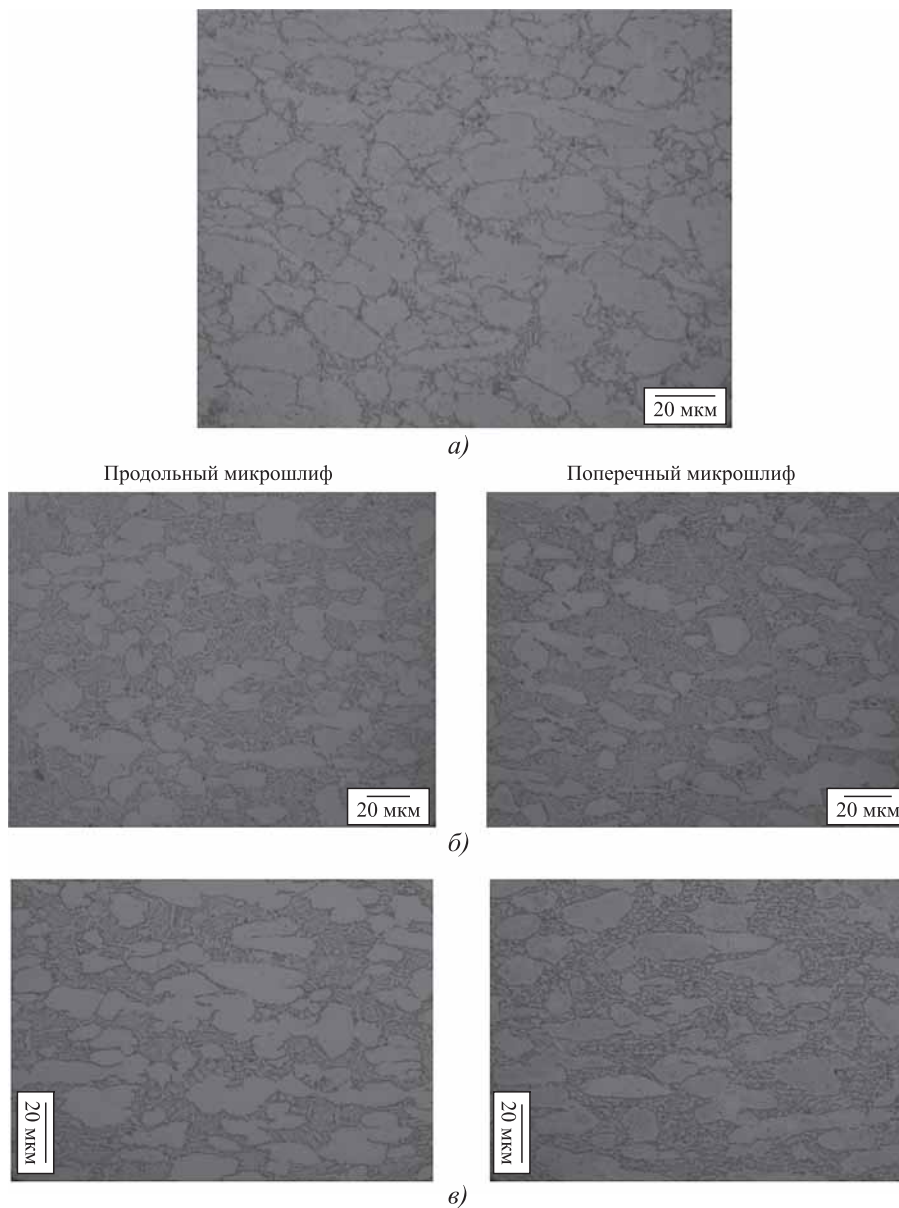


Рис. 3. Микроструктуры образцов из поковок № 1 и № 2:
 а — исходная заготовка; б — образец № 1; в — образец № 2

размер зерен α -фазы ($15,2 \pm 8,1$) мкм образца № 1 и ($14,7 \pm 7,4$) мкм образца № 2.

Таким образом, увеличение степени деформации образца при использовании модернизированной бабы молота с наполнителем не приводит к перегреву и повышению доли пластинчатой структуры и росту зерен первичной α -фазы, соответственно, механические свойства также не будут снижены.

Выводы

1. Применение бабы молота с наполнителем при осадке заготовок из титанового сплава ВТ6 позволило увеличить степень деформации заготовки на 12 % (в 1,12 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой молота.

2. При осадке заготовок из титанового сплава ВТ6 стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем микроструктура получаемых поковок одинаковая. Увеличение степени деформации образца при использовании модернизированной бабы молота с наполнителем не приводит к перегреву и повышению доли пластинчатой структуры и росту зерен первичной α -фазы, соответственно, механические свойства получаемых поковок также не будут снижены.

3. Полученные результаты экспериментального исследования процесса осадки бабой молота с наполнителем можно использовать:

— для повышения эффективностиковки и штамповки поковок из титановых сплавов на молотах;

— для увеличения производительности и сокращения общего числа ударов молота для

получения поковок заданных размеров при соответствии требованиям, предъявляемым к микроструктуре и качеству поковок из титановых сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лавриненко В.Ю.** Повышение энергоэффективности кузнечно-штамповочного оборудования ударного действия // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 11. С. 502—508.

2. **Лавриненко В.Ю., Чекалов В.П., Аюпов Т.Х.** Применение бабы молота с наполнителем для модернизации штамповочного молота с массой падающих частей 1000 кг // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 1. С. 21—24.

3. **Лавриненко В.Ю., Аюпов Т.Х.** Промышленные испытания бабы с наполнителем штамповочного молота на АО "ММЗ "Авангард" // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18. № 1. С. 19—22.

4. **Патент** на полезную модель РФ № 182268. Баба молота № 1 / В.Ю. Лавриненко и др. Оpubл. 09.08.2018, Бюл. № 22.

5. **Патент** на полезную модель РФ № 182269. Баба молота № 2 / В.Ю. Лавриненко и др. Оpubл. 09.08.2018, Бюл. № 22.

6. **Лавриненко В.Ю., Аюпов Т.Х.** Расчет экономической эффективности промышленного использования бабы с наполнителем штамповочного молота М2140 // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18. № 6. С. 262—266.

*Владислав Юрьевич Лавриненко, д-р техн. наук,
vlavrinenko@bmstu.ru;*

Артём Игоревич Алимов, канд. техн. наук;

Тафкил Хаматдинович Аюпов, канд. техн. наук;

Алия Ильдаровна Изикаева

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

(Московский государственный технологический университет "Станкин")

Разработка технологического процесса выдавливания детали типа крупногабаритного стакана со сферическим дном и фланцем

Приведены технология штамповки полых крупногабаритных цилиндрических деталей со сферическим дном и фланцем из алюминиевого сплава АК6, результаты расчетов операций высадки для подготовки начальной формы заготовки, обратного выдавливания заготовки пуансоном со сферическим торцом и ее прямого выдавливания для утонения стенки поковки.

Ключевые слова: детали крупногабаритные; детали цилиндрические с фланцем; детали полые со сферическим дном; штамповка выдавливанием; сплавы алюминиевые; оценка пластичности; деформирующие силы; прессы специализированные.

The stamping technology of hollow large-sized cylindrical parts with spherical bottom and flange made of AK6 aluminium alloy, the results of calculations for upsetting operation for preparing of the initial shape the workpiece, reverse extrusion of the workpiece by spherical end punch and its direct extrusion to thinning the forging wall are presented.

Keywords: large-sized parts; cylindrical flange parts; hollow spherical bottom parts; extrusion stamping; aluminium alloys; plasticity assessment; deforming forces; specialized presses.

Введение. Чертеж одной из крупногабаритных деталей, имеющих форму стакана со сферическим дном и фланцем, приведен на рис. 1 [1]. Материал детали — алюминиевый сплав АК6.

Основным требованием к приведенной на рис. 1 детали является неразрывность волокон ее макроструктуры, при этом форма волокон должна совпадать с контуром полости детали. Полость штампованной поковки детали в области ее сферического дна и примыкающей к нему стенки не должна нуждаться в дополнительной обработке для уменьшения шероховатости ее поверхности. Изготовить поковку детали, соответствующую приведенным требованиям, возможно выдавливанием ее из цилиндрической заготовки пуансоном с торцом сферической формы.

Также требуется, чтобы разработанный технологический процесс выдавливания проводился с одного нагрева заготовки, на одном гидравлическом прессе. Это

необходимо, чтобы штампованная поковка и изготовленная затем из нее деталь имели структуру, однородность которой не была бы нарушена промежуточным нагревом.

Для производства рассматриваемых деталей предполагается изготовление специализированного прессы, при этом в связи с большими

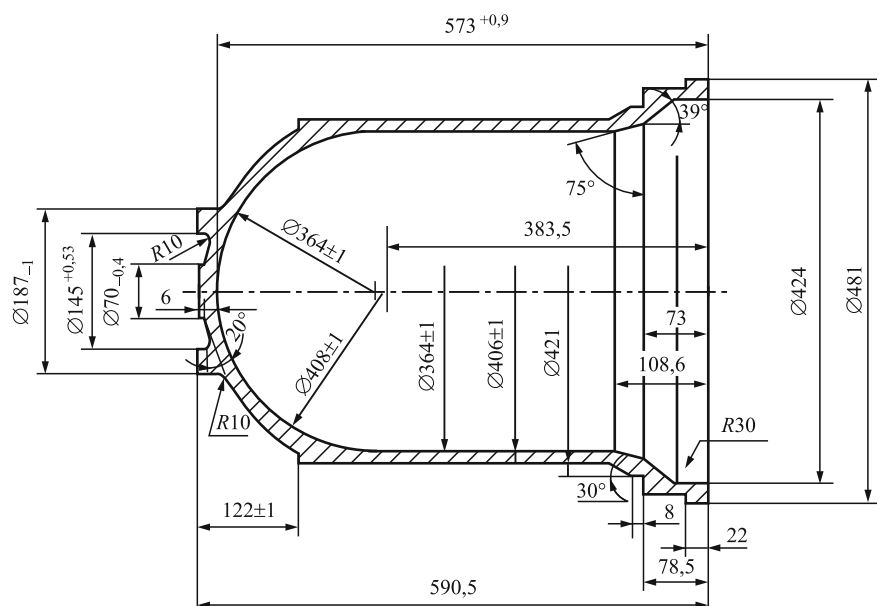


Рис. 1. Деталь типа стакана со сферическим дном и фланцем

габаритными размерами штампов число позиций формоизменения заготовки ограничено допускаемыми габаритными размерами рабочего стола прессы и конструкцией устройства перемещения этого стола при подаче каждого из штампов в рабочую позицию.

Поскольку строгое требование к расположению волокон предъявляется к внутреннему контуру детали, на внешней поверхности штампованной поковки могут быть предусмотрены напуски и припуски, впоследствии удаляемые резанием. После их назначения штампованная поковка имеет вид, приведенный на рис. 2, в. Показанную поковку целесообразно штамповать из заготовки, расположенной в матрице таким образом, чтобы волокна ее структуры совпадали по направлению с направлением движения выдавливающего полость пуансона. Поковку целесообразно штамповать из заготовки диаметром, равным диаметру фланца поковки (см. рис. 1), т.е. 481 мм.

Объем поковки, рассчитанный на основании приведенных на рис. 2 ее размеров, равен $V_{\text{п}} = 24\ 520\ \text{см}^3$. Если штамповку проводить из заготовки одного диаметра, при диаметре заготовки, равном диаметру фланца поковки, и рассчитанном объеме заготовки ее высота составит 135 мм, т.е. заготовка будет иметь высоту, которая примерно в 2,8 раза меньше ее диаметра. При штамповке такой заготовки, как видно из рис. 3, г, ее требуется уложить в полость, образованную верхней плоскостью матрицы первого перехода и контейнером. При деформировании пуансоном со сферическим торцом произойдет операция вытяжки толстолистовой заготовки

вместо операции ее обратного выдавливания. При этом волокнистость структуры изготовленной детали не будет соответствовать заданной в приведенном выше комментарии к чертежу детали. Для осуществления обратного выдавливания предложено использовать заготовку ступенчатой формы (см. рис. 2, а).

Ступенчатые заготовки, показанные на рис. 2, а, у которых больший диаметр равен диаметру фланца поковки, изготавливают холодной высадкой из исходных цилиндрических заготовок. Диаметр d_0 этих исходных заготовок, равный меньшему диаметру ступенчатых заготовок, будет обоснован в статье ниже, исходя из условия отсутствия трещинообразования (исчерпания ресурса пластичности материала) при высадке. Холодную высадку заготовок (см. рис. 2, а) предложено осуществлять на отдельном прессе. То, что ступенчатые заготовки изготавливают высадкой из прутка меньшего диаметра, является рациональным с позиции уменьшения отходов при резке прутка. Предложено разрезать пруток на исходные заготовки на пилах. После разделения прутка на исходные заготовки предусмотрено обтачивание заготовок перед высадкой в целях устранения имеющихся на поверхности прутка дефектов, а также для обеспечения требуемых длин и диаметров заготовок и перпендикулярности торцов отрезанных заготовок по отношению к их осям.

Соответствующий указанным выше требованиям рациональный маршрут формоизменения заготовки при штамповке из нее поковки (см. рис. 2, в) показан, по этапам, на рис. 3 [1].

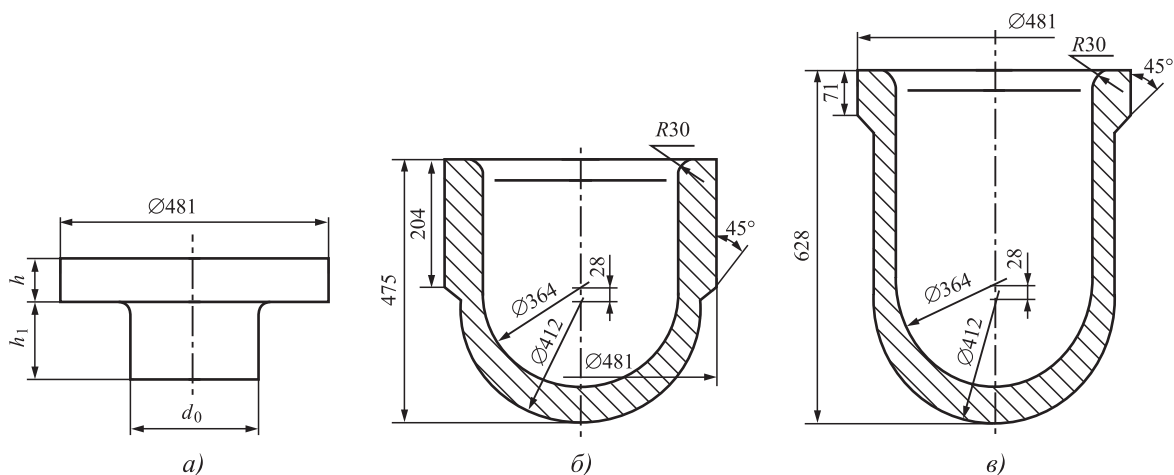


Рис. 2. Ступенчатая заготовка для выдавливания (а) и два перехода (б, в) ее формоизменения штамповкой

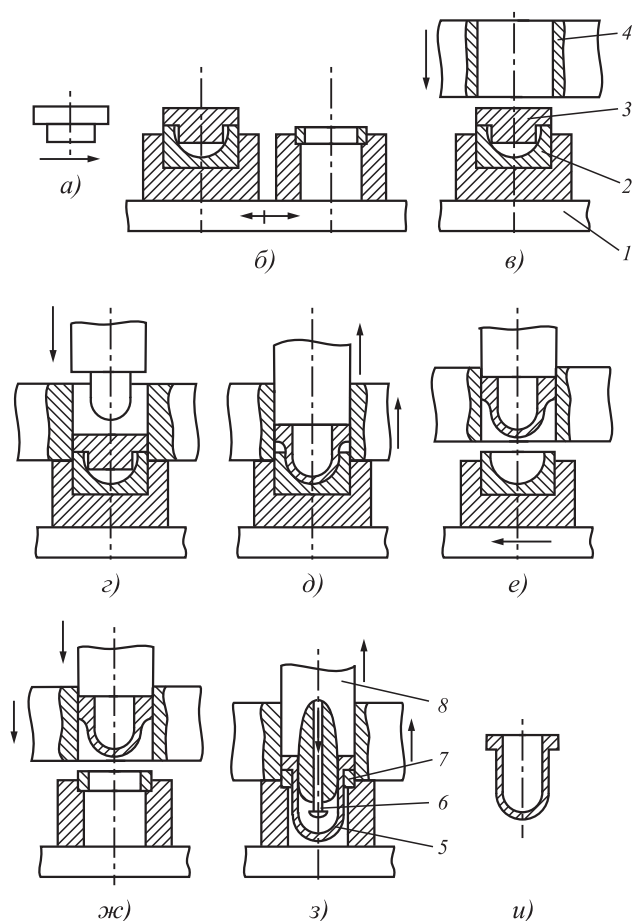


Рис. 3. Переходы штамповки и соответствующие им перемещения рабочих частей пресса и штампа

Специализация пресса, предназначенного для осуществления разрабатываемого технологического процесса, заключается во введении в его конструкцию передвижного стола и дополнительной траверсы. На передвижном столе (см. рис. 3, б), обозначенном на рис. 3, в позицией 1, установлены матрицы 2 (см. рис. 3, в) и 7 (см. рис. 3, з) первого и второго переходов соответственно. В дополнительной траверсе пресса размещен контейнер 4 штампа.

Заготовку 3, которая показана на рис. 3, а, укладывают в матрицу первого перехода (см. рис. 3, б). Контейнер опускают, как показано на рис. 3, г, и он охватывает матрицу. Ползун пресса с установленным на нем пуансоном 8 (см. рис. 3, з) совершает рабочий ход. В начале деформирования заготовки ее металл заполняет сферическую полость (см. рис. 3, д) матрицы, затем оформляется сферическое дно детали и одновременно осуществляется обратное выдавливание стенки полуфабриката (см. рис. 2, а), имеющей большую толщину и меньшую высоту, чем у окончательной по-

ковки. В процессе формирования стенки полуфабриката при обратном выдавливании заготовки наблюдается нестабильное заполнение пространства между пуансоном и контейнером. В нижней части формируемого фланца вытекший в полость между пуансоном и контейнером металл не примыкает к стенке контейнера. Однако в конце операции обратного выдавливания фланец пуансона осаживает фланцевую часть полуфабриката и оформляет заданную чертёжом его форму (см. рис. 2, б).

Необходимость операции выдавливания полуфабриката с меньшей глубиной полости, чем у готовой поковки, объясняется проблемой ресурса смазочного слоя на сферическом торце выдавливающей полость пуансона. Авторами было описано [7], что пуансон со сферическим торцом удерживает на своей поверхности смазку хуже, чем пуансоны с другими возможными формами торцов. В то же время одним из требований при разработке процесса является отсутствие дополнительных обработок для обеспечения качества поверхности полости детали. Также нежелательно увеличение числа операций, которое имело бы место при выдавливании полости поковки пуансоном с другой формой торца и последующем калибровании дна со стороны полости сферическим пуансоном. При этом не были бы обеспечены непрерывное течение металла и формирование неразрывной структуры волокон вдоль внутренней сферической поверхности поковки.

После выдавливания полуфабриката, имеющего дно, соответствующее готовой поковке, а стенку — укороченную и утолщенную по сравнению с поковкой, контейнер и пуансон, как показано на рис. 3, д, отводят вверх, при этом благодаря трению на поверхности контейнера полуфабрикат остается на пуансоне. На рис. 3, е и ж показано, что после подъема контейнера и пуансона стол перемещают, и матрицу 2, в которой проводилось обратное выдавливание, заменяют матрицей 7 для прямого выдавливания. После показанного на рис. 3, з прямого выдавливания заданной поковки 5 пуансон и контейнер отводят вверх, и съемник 6 снимает поковку 5 с пуансона. Изготовленная поковка приведена на рис. 3, и.

При проектировании специализированного пресса для реализации показанного на рис. 3 процесса формоизменения заготовок необходимо знание величин деформирующих сил обратного и прямого выдавливания.

Цель работы — определение рациональной формы ступенчатых заготовок, имеющих участки двух диаметров, у которых больший диаметр равен диаметру фланца поковки. Ступенчатые заготовки предполагается изготавливать холодной высадкой из отрезанных пилой от прутка и обточенных на станке цилиндрических заготовок, диаметр которых равен меньшему диаметру ступенчатой заготовки. Также определяли диаметр исходной цилиндрической заготовки, позволяющей осуществлять ее холодную высадку без потери устойчивости и разрушения при высадке; силу холодной высадки ступенчатой заготовки для выбора пресса, выполняющего высадку; силу каждого из двух переходов штамповки поковки стакана со сферическим дном и фланцем, что необходимо для задания силы, которую должен создать разрабатываемый специализированный пресс.

Основная часть. Для определения рациональных размеров h , h_1 и d_0 ступенчатой заготовки (см. рис. 2, а), исходя из знания объема поковки, проведено следующее исследование.

Оценивается возможность высадки без разрушения на исходной заготовке диаметром d_0 торцевого участка диаметром $d = 481$ мм.

В опасной точке А заготовки, расположенной на середине высоты высаживаемого участка (рис. 4), относительное (по отношению к напряжению текучести материала) гидростатическое давление определяется по формуле [2]:

$$\sigma = -0,333 - \frac{\mu h}{d}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент контактного трения на торце высаживаемой части заготовки.

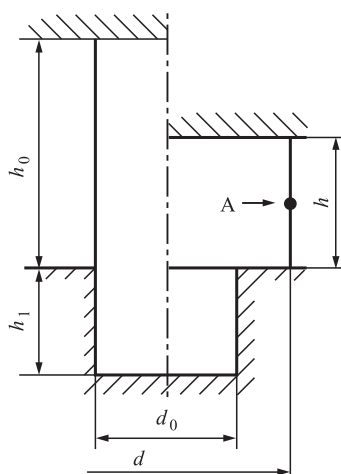


Рис. 4. Схема высадки фланца

Поскольку высадка проводится в холодном состоянии заготовки, и технологический процесс позволяет на этапе высадки смазать торец заготовки, например, техническим животным жиром, в формуле (1) принято значение $\mu = 0,1$. При высадке в холодном состоянии и хорошей смазке торцевой поверхности заготовки у высаженной ее части бочкообразность практически не наблюдается.

Определение рациональных величин d_0 и h_0 (см. рис. 4), а также оценка возможности при таких d_0 и h_0 высадки заготовки, показанной на рис. 2, а, без ее разрушения проведены следующим образом.

Для недопущения потери устойчивости заготовки при высадке на ней фланца (см. рис. 4) принято, что длина отрезанной от прутка и обточенной исходной цилиндрической заготовки $H = h_0 + h_1 = 2,5d_0$. Тогда $(\pi d_0^2/4) \cdot 2,5d_0 = V_{\text{п}}$. Отсюда $d_0 = 232$ мм и $H = 580$ мм. Из условия укладки ступенчатой заготовки (см. рис. 2, а) диаметром $d_0 = 232$ мм в сферическую полость матрицы заданного чертежом поковки (см. рис. 2, в) диаметра графически определено, что $h_1 = 133,5$ мм. Таким образом, высадке подвергается часть исходной заготовки с размерами (см. рис. 4) $d_0 = 232$ мм; $h_0 = 580 - 133,5 = 446,5$ мм. Высаживают ступенчатую заготовку с размерами участка меньшего диаметра (см. рис. 2, а) $d_0 = 232$ мм, $h_1 = 133,5$ мм и участка большего диаметра $d = 481$ мм. Из условия равенства объема ступенчатой заготовки с объемом поковки определено, что $h = 104$ мм.

Соотношение размеров высаживаемой части заготовки перед высадкой $h_0 = 1,9d_0$. Такая заготовка будет обладать надежной устойчивостью при высадке.

По формуле (1) определено, что $\sigma = -0,335$.

В качестве диаграммы пластичности для алюминиевого сплава АК6 использовали кривую для алюминиевого сплава Д1 [3]. Правомерность такой замены подтверждена в частности в работе [4], где указано, что "область применения сплава АК6 — штамповка и ковка деталей сложной формы и средней прочности наравне со сплавом Д1 там, где требуется большая пластичность в горячем состоянии и допустима несколько меньшая пластичность в холодном состоянии".

На рис. 5 представлена кривая пластичности, перестроенная в принятые в работе [2] координаты.

В работе [2] среднее напряжение σ принято в относительном виде (по отношению к напря-

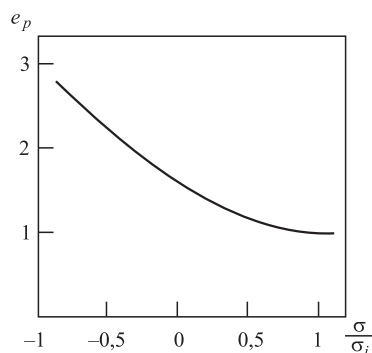


Рис. 5. Кривая пластичности материала заготовки в холодном состоянии

жению текучести $\sigma_s = \sigma_i$, где σ_i — интенсивность напряжений). Поэтому на оси абсцисс графика на рис. 5 указано отношение σ/σ_i .

Накопленную деформацию в опасной точке А, расположенной на боковой поверхности высаживаемой заготовки в середине ее высоты h , определяли по следующей формуле [2]:

$$e_{iA} = (1 + 2\mu) \ln \frac{h_0}{h}. \quad (2)$$

По графику на рис. 5 определено, что $e_p = 2,1$. По формуле (2) $e_{iA} = 1,752$. Таким образом, $e_{iA} \leq e_p$, и разрушения высаживаемой заготовки не произойдет.

Относительную удельную силу высадки фланца вычисляли по формуле [2]:

$$q = 1 + \frac{\mu d^4 + 0,25d_0^3 d - 0,5\mu d_0^4}{4d^3 h}, \quad (3)$$

где $d_0 = 232$ мм; $d = 481$ мм; $h = 104$ мм; $\mu = 0,1$.

В результате расчета получено $q = 1,174$. Это значение относительной (отнесенной к напряжению текучести материала) удельной силы умножено на напряжение текучести сплава АК6. Чтобы воспользоваться графиком для определения напряжения текучести (рис. 6), необходимо знание накопленной деформации в заготовке:

$$e_i = \ln \frac{h_0}{h}. \quad (4)$$

В формулу (4) входят показанные на рис. 4 величины $h_0 = 446,5$ мм и $h = 104$ мм. Рассчитанная по формуле (4) величина $e_i = 1,46$. Из графика на рис. 6 следует, что при этом значении величины e_i напряжение текучести $\sigma_s = 390$ МПа. Сила высадки, определенная по формуле $q\sigma_s\pi d^2/4$, равна 47 600 кН. В соответствии с размерным рядом сил кузнечно-штам-

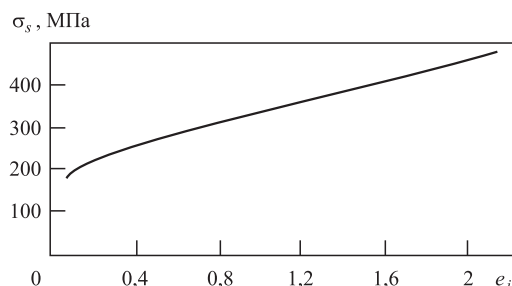


Рис. 6. Напряжение текучести алюминиевого сплава АК6 при комнатной температуре

повочных машин для высадки ступенчатой заготовки выбран пресс силой 50 МН.

В разработанном технологическом процессе (см. рис. 3) заготовки из сплава АК6 предложено нагревать в электрической печи сопротивления камерного типа мод. ПН-15, имеющей принудительную циркуляцию воздуха и автоматическое регулирование температуры. Температура нагрева заготовок составляет 410 °С, время выдержки нагретых заготовок при этой температуре 2 ч [6]. Прибор для автоматического регулирования температуры должен обеспечивать точность в пределах ± 10 °С. Охлаждение изготовленных поковок осуществляется на воздухе. Предусмотрено смазывание заготовок перед штамповкой графито-коллоидной смазкой ГК-1.

Предусмотрен разогрев матриц перед началом штамповки укладываемыми в их полости стальными болванками, нагретыми в камерной электропечи сопротивления до температуры 350 °С. Разогрев пуансона не предусмотрен.

Для определения силы на переходе штамповки полуфабриката пуансоном со сферическим торцом в матрице со сферическим дном исследовано изменение силы по ходу этой формоизменяющей операции, чтобы установить, в какой именно момент сила максимальна [7]. Эксперименты проводили на заготовках из свинца С00, практически не имеющего деформационного упрочнения. Выдавливание осуществляли в матрице с диаметром рабочей полости 30 мм, используя пуансоны с диаметрами рабочих торцов 25 и 15 мм, для которых соответствующий относительный радиус матрицы R (определяемый отношением диаметра матрицы к диаметру рабочего торца пуансона) равен 1,2 и 2,0. В первом случае опыты проводили с заготовками высотой 11 мм, смазанными смесью индустри-

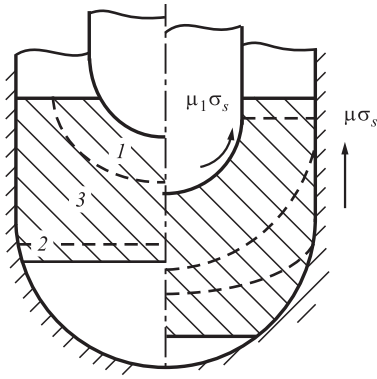


Рис. 7. Схема выдавливания цилиндрической заготовки пуансоном со сферическим торцом в матрице со сферическим дном

ального масла И-20А (ГОСТ 20799) и дисульфида молибдена, во втором случае использовали смазанные и обезжиренные ацетоном заготовки высотой 23 мм.

Схема выдавливания штампованных заготовок рассматриваемого типа приведена на рис. 7, где μ_1 — коэффициент трения на контакте с пуансоном.

Построенный по результатам проведенного исследования типовой график изменения удельной силы по ходу выдавливания детали со сферическим дном показан на рис. 8. Удельная сила определена как сила выдавливания, деленная на площадь поперечного сечения пуансона. Ниже рассмотрены этапы, обуславливающие особенности формоизменения заготовки, соответствующие отдельным участкам графика, приведенного на рис. 8.

На участке ОА (см. рис. 8) происходит внедрение S сферического торца пуансона в заготовку и одновременно начинается заполнение сферической полости дна матрицы (см. рис. 7, слева). Верхний очаг пластической деформации

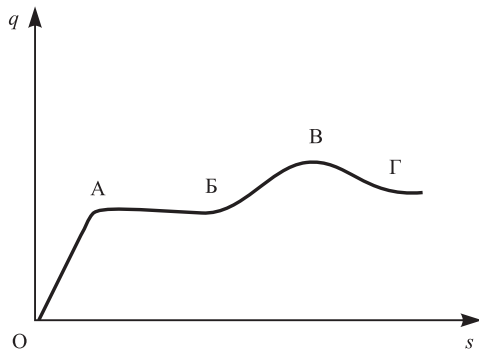


Рис. 8. Типовой график изменения удельной силы выдавливания "стакана" со сферическим дном для заготовки из неупрочняющегося материала

ции 1 отделен от нижнего очага 2 жесткой областью 3.

При рабочем ходе, соответствующем точке А (см. рис. 8) торец пуансона полностью внедряется в заготовку, после чего наступает квазистационарная стадия выдавливания АБ (см. рис. 7, справа). Поскольку на данной стадии вследствие интенсивного заполнения сферической полости матрицы происходит преимущественное перемещение материала заготовки вниз, это вызывает соответствующее перемещение верхней части заготовки, в результате чего в области контакта очага пластической деформации 1 и матрицы возникают активно направленные напряжения контактного трения.

Для определения удельной силы выдавливания на данной стадии используют приведенную в [7] формулу (5), подставляя значения коэффициента трения по напряжению текучести μ со знаком "–", что соответствует активному действию напряжений контактного трения:

$$q = \sigma_s \times \left[1 + 2 \ln \frac{R+1}{2} + 0,385 \frac{R[(\mu + 0,5)R + 2\mu_1]}{R-1} \right]. \quad (5)$$

По мере заполнения сферической полости матрицы перемещение материала заготовки вниз замедляется, в результате этого напряжения контактного трения между верхней частью заготовки и матрицей постепенно изменяют свое направление и становятся реактивными, что вызывает соответствующий рост силы выдавливания на участке БВ (см. рис. 8).

Точка В на рис. 8 соответствует моменту полного заполнения донной части матрицы (рис. 9, слева). Соответствующую этой точке удельную силу вычисляют по формуле (5), в которую подставляют значение μ со знаком "+".

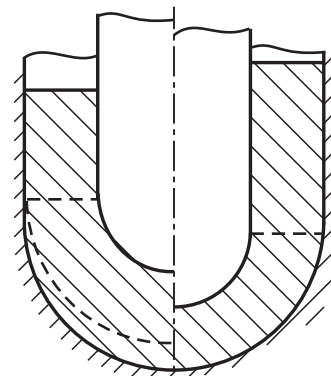


Рис. 9. Форма заготовки перед окончанием выдавливания

При дальнейшем ходе пуансона нижняя граница очага пластической деформации *1* перестает соприкасаться с жесткой областью *3* и выходит на поверхность дна матрицы (рис. 9, справа), в связи с чем на этой границе предельное касательное напряжение сдвига изменяется на напряжение контактного трения меньшей величины.

С учетом этого удельную силу выдавливания, соответствующую совпадению центров сферических поверхностей пуансона и матрицы (точка Г на рис. 8), определяют по выражению

$$q = \sigma_s \left[1 + 2 \ln \frac{R+1}{2} + 0,77 \frac{R(\mu R + \mu_1)}{R-1} \right]. \quad (6)$$

Таким образом, удельная сила выдавливания максимальна в точке В (см. рис. 8).

Для проведения расчета силы требуется знание напряжения текучести сплава АК6 при температуре горячей штамповки. Эта температура определена по справочнику [6], она равна 410 °С. Зависимость предела прочности, соответствующего при горячей штамповке напряжению текучести, для сплава АК6 от температуры заимствована из работы [4]. При этом отражающая указанную зависимость прямая пролонгирована до 410 °С, а значения предела прочности, указанные на оси ординат, переведены в МПа (рис. 10).

При анализе формоизменения заготовки было отмечено, что для заполнения фланца полуфабриката, показанного на рис. 2, б, в конце операции обратного выдавливания сферической части полости фланец пуансона осаживает фланцевую часть полуфабриката и оформляет заданную чертежом его форму. Поскольку на участке ВГ графика на рис. 8 удельная сила выдавливания существенно снижается, то рассчитанной с помощью формулы (5) силы для точки В достаточно для выдавливания на за-

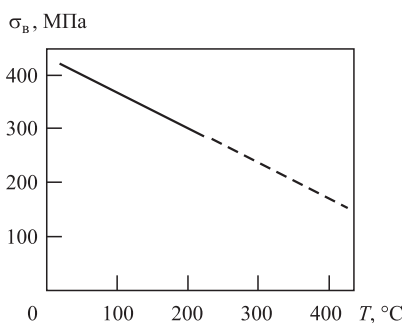


Рис. 10. Зависимость предела прочности сплава АК6 от температуры нагрева

ключительной стадии сферической части и одновременной осадки фланцевой части полуфабриката.

При расчете удельной силы обратного выдавливания $q_{o.в}$ по формуле (5) в нее были подставлены значения $R = 1,13$; $\mu = 0,3$; $\mu_1 = 0,4$. По графику на рис. 10 определено, что предел прочности сплава при температуре 410 °С равен 150 МПа. Это значение σ_B подставлено вместо напряжения текучести σ_s в формулу (5). Такая замена этих параметров является обычной при расчете сил операций горячей штамповки. В результате расчета получено $q_{o.в} = 1023$ МПа. Силу $P_{o.в}$, которую должен развить пресс на первом переходе штамповки, определяют как удельную силу $q_{o.в}$, умноженную на площадь поперечного сечения выдавливаемого полость пуансона диаметром 364 мм. В результате получено $P_{o.в} = 104$ МН.

Для определения силы на переходе штамповки поковки прямым выдавливанием из полуфабриката (см. рис. 3, з) использованы результаты анализа, опубликованного в [8]. В этой работе использована расчетная схема, приведенная на рис. 11. В результате проведенного по схеме анализа получена формула (7) для расчета относительной (отнесенной к напряжению текучести материала заготовки) удельной силы выдавливания. В формуле (7) удельная сила определяется как отношение силы, создаваемой прессом, к площади поперечного сечения ступени пуансона δ (см. рис. 3, з), создающей осевую силу на фланец полученного на первом переходе штамповки полуфабриката.

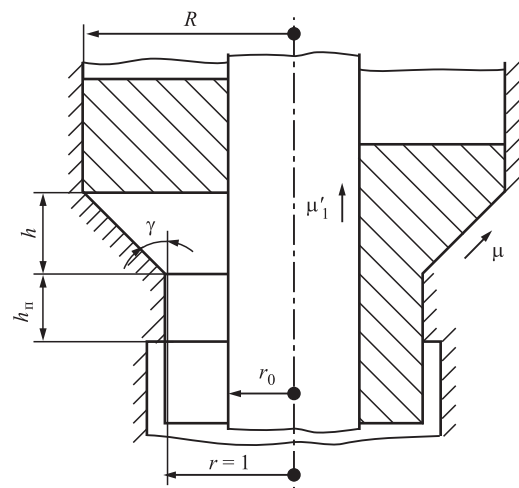


Рис. 11. Расчетная схема выдавливания трубной части поковки

Относительную удельную силу прямого выдавливания трубной части поковки вычисляют по формуле

$$q_{п.в} = \frac{1,1}{R^2 - r_0^2} \times \left\{ 1,5(R^2 - 1) + R^2 \ln R + \frac{(R^2 + 1 - 2r_0^2) \left[0,5 - 0,25 \left(1 - \frac{1}{R} \right) \cos \gamma + \mu'_1 r_0 \right]}{1 - r_0^2} - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right\} h + \left\{ \frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right) \left[R^4 (\ln R - 0,75) + R^2 - 0,25 \right]}{(R^2 - 1)h} \right\} + 2 \frac{(\mu + \mu'_1 r_0) h_{п.}}{1 - r_0^2}, \quad (7)$$

где $h_{п.}$ — высота калибрующего пояса матрицы; μ , μ'_1 — коэффициенты трения по напряжению текучести (μ'_1 характеризует трение в области пластической деформации); R — относительный радиус контейнера.

Отметим, что все указанные на рис. 11 размеры имеют относительные величины. Их фактические размеры отнесены к фактическому размеру меньшего радиуса матрицы. Поэтому на рис. 11 величина $r = 1$. Поскольку, как видно на рис. 3, з, нижняя часть пуансона δ , оформляющая полость выдавливаемой поковки, является единым целым с остальной частью пуансона, в формуле (7) коэффициент $\mu'_1 = 0,5\mu$ [8].

В результате расчета по формуле (7) получено, что относительная (отнесенная к напряжению текучести материала заготовки) удельная сила прямого выдавливания $q_{п.в} = 3,21$. При горячей штамповке в качестве напряжения текучести материала традиционно используют значение его предела прочности при заданной температуре нагрева. Выше в статье такая замена характеризующих материал параметров уже была использована при расчете удельной силы обратного выдавливания полуфабриката. Для перехода к удельной силе рассчитанное значение $q_{п.в}$ умножено на предел прочности сплава АК6 при температуре 410 °С, равный 150 МПа. В результате получено $q_{п.в} \cdot 150 \text{ МПа} = 481,5 \text{ МПа}$. Силу $P_{п.в}$, которую должен развить пресс на втором переходе штамповки, определяют как удельную силу $q_{п.в} \cdot 150 \text{ МПа}$, умноженную еще на площадь торца ступени выдавливающего полость пуансона с внешним диаметром 481 мм и внутренним диаметром 364 мм. После расчета площади кольцевой поверхности торца

ступени пуансона, имеющей указанные размеры, и умножения рассчитанного значения удельной силы на эту площадь определено значение силы прямого выдавливания $P_{п.в} = 37,5 \text{ МН}$.

Заключение. Установлено, что поковки рассматриваемых деталей рационально изготавливать из предварительно подготовленных ступенчатых заготовок, у которых диаметр большего участка высотой 104 мм равен диаметру фланца поковки (481 мм), а участок меньшего диаметра (232 мм) имеет высоту 133,5 мм. Такие ступенчатые заготовки возможно изготавливать холодной высадкой из отрезанных пилой от прутка цилиндрических заготовок, диаметр и длина которых несколько превышают 232 и 580 мм соответственно, и обточенных на станке до указанных чистовых размеров. Рассчитанная сила пресса, на котором проводится холодная штамповка ступенчатых заготовок высадкой, равна 50 МН.

В связи с тем, что операции горячего формоизменения заготовки выполняются последовательно, при проектировании специализированного пресса из двух определенных выше для каждого перехода штамповки деформирующих сил принята та, которая больше. Это сила операции обратного выдавливания, равная 104 МН.

В техническом задании на проектирование специализированного пресса указана его сила 100 МН, соответствующая размерному ряду кузнечно-штамповочных машин. Правомерность назначения меньшей силы, чем рассчитанная выше, — это большая масса штампуемой поковки.

Принцип подобия при проектировании процессов штамповки малогабаритных и крупногабаритных поковок применяют, используя масштабный коэффициент, на который умножают теоретически определенную силу [9]. Это связано с тем, что в расчетные формулы для вычисления сил деформирования входит величина напряжения текучести σ_s . Эту величину определяют в лабораторных условиях на малых образцах.

Из практики известно, что при обработке давлением геометрически подобных заготовок из одинакового материала, нагретых до одной и той же начальной температуры, удельная сила деформирования уменьшается с увеличением размеров заготовки. Для расчета сил горячей штамповки больших образцов масштабный коэффициент, по данным С.И. Губкина, при увеличении деформируемого объема от 25 до 25 000 см³ имеет значения, уменьшающиеся от 1 до 0,4. С учетом масштабного коэффициента сила разрабатываемого специализированного пресса 100 МН задана с существенным запасом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов Е.И., Овчинников А.Г., Дмитриев А.М. Исследование процесса обратного выдавливания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1975. № 12. С. 121–126.
2. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Общая теория осадки и высадки сплошной цилиндрической

заготовки. Часть II. Высадка // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. № 4 (57). С. 57–77.

3. Белевич А.В. Моделирование показателей пластичности и сопротивления деформации сталей и сплавов: практикум по технологической механике. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2005. 84 с.

4. **Справочник** по машиностроительным материалам. В 4 т. Т. 2. Цветные металлы и сплавы / под ред. М.А. Бочвара; под общ. ред. Г.И. Погодина-Алексеева. М.: МАШГИЗ, 1959. 639 с.

5. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.

6. **Ковка** и штамповка цветных металлов: справочник / коллектив авторов. М.: Машиностроение, 1971. 232 с.

7. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л., Абрамов Е.А. Комбинированное выдавливание полых цилиндрических изделий со сферическим дном // Металлообработка. 2002. № 3 (9). С. 22–24.

8. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Определение технологических параметров выдавливания трубных изделий // Производство проката. 2003. № 8. С. 34–41.

9. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. Изд. 4-е. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

Александр Михайлович Дмитриев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук;

Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук,
mt-6@yandex.ru



В.И. Платонов, П.В. Романов (Тульский государственный университет),
В.Н. Чудин (Российский университет транспорта, Москва)

Расчет режимов осадки ребра на плите при их сборке*

Предложены соотношения для расчета деформационного и силового режимов осадки ребра на плите (листе) при их сборке. Принято состояние вязкопластичности материала в условиях изотермического нагрева. Использовано разрывное поле скоростей перемещений. Приведен расчет потери сплошности материала заготовок.

Ключевые слова: вязкопластичность; кинематика; давление; сплошность материала.

The relations for calculating of the deformation and force upsetting modes of edge on the plate (sheet) during their assembly are proposed. The state of viscoplasticity of the material under isothermal heating is assumed. The discontinuous field of travel speeds is used. The calculation of the loss of continuity of the workpiece material is given.

Keywords: viscoplasticity; kinematics; pressure; material continuity.

Осадку ребер на листах и плитах используют при сборке (сварке давлением) различных многоэлементных конструкций, изготовление которых другими методами затруднительно. Такими конструкциями являются панели с ребрами жесткости, детали с утолщениями стенок и полками и др. (рис. 1).

При соединении давлением сборку исходных заготовок сжимают пластически (осаживают) и выдерживают под давлением [1–3]. Деформации и давление осадки определяют качество сварки. Рассмотрим эту операцию применительно к панели, состоящей из плиты и поперечных ребер жесткости. Расчетная схема осадки показана на рис. 2, а. Процесс осуществляется в изотермических условиях при температуре $(0,4...0,6)T_{пл}$.

Силовой режим операции рассчитывали по верхнеграничному методу с использованием жестко-блочного разрывного поля скоростей перемещений при плоской деформации [4]. При этом справедливо неравенство

$$q\delta_1 v_0 \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \sum \sigma_{ep} v_{\tau} l_p, \quad (1)$$



Рис. 1. Детали с ребрами

где q — максимальное давление осадки; σ_{ep} — эквивалентное напряжение на линиях разрыва скоростей; v_0 , v_{τ} — скорость перемещения нажимной плиты штампа и касательная скорость на линиях разрыва соответственно; δ_1 — толщина ребра; l_p — длина линий разрыва скоростей.

Состояние деформируемого материала — вязкопластичность, что определяется уравнением [5]

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n, \quad (2)$$

* Работа выполнена в рамках гранта НШ-2601.2020.8.

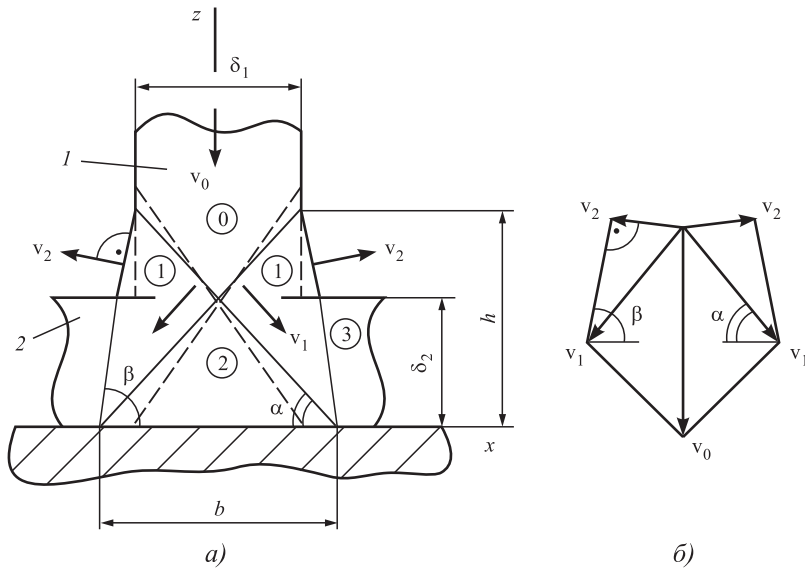


Рис. 2. Схема осадки ребра на плите, поле (а) и годограф скоростей (б): 1 — ребро; 2 — плита (лист)

где ε_e, ξ_e — эквивалентные деформация и скорость деформаций; A, m, n — константы.

Деформационные и силовые режимы. Режимы осадки рассчитаем по кинематике деформирования, исходя из поля скоростей. Поле приведено на схеме осадки (см. рис. 2, а). Зона деформаций распространяется на концевую часть ребра и плиту. При этом на ребре образуется галтель (утолщение). Поле состоит из жестких блоков 0, 1, 2 и 3. Углы поля скоростей связаны зависимостями, определяющими кинематическую допустимость поля, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \arctg \frac{\delta_1 \operatorname{tg} \alpha + 2\delta_2}{2\delta_2 \operatorname{ctg} \alpha - \delta_1}, \\ \frac{\delta_1 \cos \beta}{2\delta_2 \sin \alpha - \delta_1} &= \frac{\cos \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin 2\alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где δ_2 — толщина плиты; α, β — углы наклона линий разрыва скоростей.

Система (3) решается численно.

Блоки поля ограничены линиями разрыва скоростей, длины которых

$$\left. \begin{aligned} l_{01} &= \frac{\delta_1}{2 \cos \alpha}; \quad l_{12} = \frac{\delta_2}{\sin \alpha}; \\ l_{13} &= \frac{1}{2}(b - \delta_1) \frac{1}{\cos \beta}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где b — ширина зоны деформаций.

Деформации происходят на линиях разрыва скоростей. Разрыв имеют только касательные составляющие скоростей. Поле нестационарно.

Линии разрыва поворачиваются в процессе осадки с изменением углов α и β . Это вызывает дополнительные нормальные скорости на линиях разрыва скоростей, что влияет на деформационный и силовой режимы операции [6]. Скорость блоков получим с помощью годографа скоростей на рис. 2, б. Таким образом,

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= v_0 \frac{\cos \alpha}{\sin 2\alpha}; \\ v_2 &= \frac{v_0 \cos \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin 2\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Обратимся к линиям разрыва скоростей, используя годограф. На линиях "01":

$$v_\tau = \frac{v_0}{2 \sin \alpha}; \quad v_n = v_0 \cos \alpha, \quad (6)$$

где v_n — нормальная скорость;

$$\left. \begin{aligned} v_n^* &= l_{01} \frac{d\alpha}{dt} = l_{01} \frac{d}{dt} \arctg \frac{h}{\delta_1} = \\ &= \frac{v_0}{\left[1 + \left(\frac{h}{\delta_1}\right)^2\right] \cos \alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где v_n^* — дополнительная нормальная скорость; h — высота деформаций.

Эквивалентные деформацию, скорость деформаций и напряжение представим, учитывая выражения (6), (7) и уравнение (2), как

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{e01} &= \frac{v_\tau}{\sqrt{3}(v_n + v_n^*)} = \frac{1}{\sqrt{3}k_1 \sin 2\alpha}; \\ \xi_{e01} &= \frac{v_0}{\Delta h} \varepsilon_{e01}; \quad \sigma_{e01} = A \left(\frac{v_0}{\Delta h}\right)^n \varepsilon_{e01}^{m+n}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$k_1 = 1 + \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h}{\delta_1}\right)^2\right] \cos^2 \alpha};$$

Δh — рабочий ход нажимной плиты (осадка).

Используя выражения (4), (6) и (8), запишем

$$\sigma_{e01} v_\tau l_{01} = \frac{A \delta_1 v_0^{1+n}}{(\Delta h)^n \sin 2\alpha} \varepsilon_{e01}^{m+n}. \quad (9)$$

На линиях "12" получим аналогично:

$$\left. \begin{aligned} v_\tau = v_1; \quad \varepsilon_{e12} = \frac{k_2 \cos \alpha}{\sqrt{3}k_2 \sin 2\alpha}; \\ \sigma_{e12} = A \left(\frac{v_0}{\Delta h} \right)^n \varepsilon_{e12}^{m+n}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $k_2 = 2 \left[1 + \left(\frac{\delta_1}{2\delta_2} \right)^2 \right] \sin \alpha$.

Запишем, учитывая выражения (4), (5) и (10):

$$\sigma_{e12} v_\tau l_{12} = \frac{A \delta_2 v_0^{1+n}}{(\Delta h)^n \sin \alpha} \varepsilon_{e12}^{m+n}. \quad (11)$$

На линиях разрыва скорости "13":

$$\left. \begin{aligned} v_\tau = v_1 \cos(\beta - \alpha); \quad \varepsilon_{e13} = \frac{\cos \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sqrt{3}k_3}; \\ \sigma_{e13} = A \left(\frac{v_0}{\Delta h} \right)^n \varepsilon_{e13}^{m+n}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$k_3 = \frac{\cos \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin 2\alpha} + \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{b - \delta_1}{h} \right)^2 \right] \sin \beta};$$

$$b = 2\delta_2 \operatorname{ctg} \alpha.$$

Согласно выражениям (4), (5) и (12):

$$\begin{aligned} \sigma_{e13} v_\tau l_{13} = \\ = \frac{A(b - \delta_1) v_0^{1+n} \cos \alpha \cos(\beta - \alpha)}{(\Delta h)^n \sin 2\alpha \cos \beta} \varepsilon_{e13}^{m+n}. \end{aligned} \quad (13)$$

Выражения (9), (11) и (13) внесем в неравенство (1). Соотношение для расчета давления осадки получим в виде

$$\begin{aligned} q \leq \frac{A}{\sqrt{3}} \left(\frac{v_0}{\Delta h} \right)^n \frac{1}{\sin 2\alpha} \left[\varepsilon_{e01}^{m+n} + \frac{2\delta_2}{\delta_1} \varepsilon_{e12}^{m+n} \operatorname{ctg} \alpha + \right. \\ \left. + \frac{(b - \delta_1) \cos \alpha \cos(\beta - \alpha)}{\delta_1 \cos \beta} \varepsilon_{e13}^{m+n} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Давление зависит, как это следует из выражения (14), от степени осадки и скорости операции.

Сплошность материала. Оценим потери сплошности материала заготовок в зоне деформаций. Примем осредненно, что

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta h}{h}; \quad \xi_e = \frac{v_0}{h}; \quad \sigma_e = A \frac{(\Delta h)^m v_0^n}{h^{m+n}}. \quad (15)$$

Воспользуемся уравнениями кинетики несплошности [1], учитывая выражения (15). По энергетическому уравнению получим

$$\psi = 1 - \int \sigma_e \xi_e dt = 1 - \frac{A(\Delta h)^{1+m} v_0^n}{(1+m) A_{\text{пр}} h^{m+n+1}}, \quad (16)$$

по деформационному уравнению

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{\text{епр}}} = 1 - \frac{\Delta h}{h \varepsilon_{\text{епр}}}, \quad (17)$$

где $1 \geq \psi \geq 0$ — сплошность материала; $A_{\text{пр}}$, $\varepsilon_{\text{епр}}$ — предельные константы материала при данной температуре. Критическое состояние наступает при $\psi = 0$.

Расчетные данные. Расчеты выполнены применительно к осадке сборки заготовок из алюминиевого сплава АМг6 при температуре 450 °С и титанового сплава ВТ14 при 900 °С в соответствии со схемой на рис. 2, а. Приняты размеры: $\delta_1 = 2$ мм; $\delta_2 = 2$ мм; $h = 3,3$ мм; $\Delta h = 2$ мм. Константы материалов приведены в таблице.

На рис. 3 приведены графики давления $q(v_0)$ и сплошности $\psi(v_0)$ при осадке в функции скорости деформирования. Из графиков следует,

Константы уравнения состояния материалов

Сплав	A, МПа	m	n	A _{пр}	ε _{епр}
АМг6	55	0,2	0,05	539	—
ВТ14	67	0,1	0,08	—	0,71

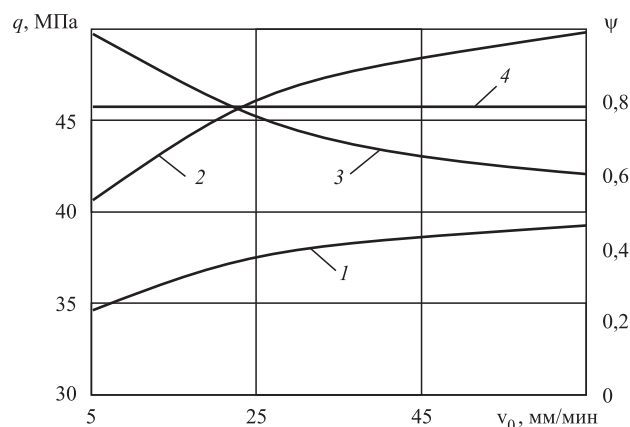


Рис. 3. Зависимости давления q (1, 2) осадки ребра и сплошности ψ (3, 4) материала от скорости v_0 перемещения нажимной плиты штампа:

1, 3 — для сплава АМг6; 2, 4 — для сплава ВТ14

что давление уменьшается при снижении скорости операции. Наиболее существенно уменьшение давления при низких скоростях. Сплошность материала АМгб снижается при увеличении скорости осадки. Сплошность сплава ВТ14 от скорости не зависит, а определяется только степенью формоизменения.

Выводы

1. Режимы осадки сборки соединения заготовок осуществляются с нагревом в условиях кратковременной ползучести.

2. Силовые режимы зависят от скорости (длительности) деформирования. Сплошность материала заготовок уменьшается по ходу осадки. Для одних материалов она зависит от скорости деформирования, для других — только от степени формоизменения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Изотермическое** деформирование высокопрочных материалов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М.: Машиностроение, 2003. 427 с.

2. **Соболев Я.А., Чудин В.Н., Кузнецов М.В.** Формообразование корпусных трехслойных стрингерных панелей // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 4. С. 16—19.

3. **Определение** рациональных режимов осадки с кручением заготовок титана ВТ1-0 с применением метода активного эксперимента / И.А. Бурлаков, Д.М. Забельян, П.А. Петров и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 5. С. 203—207.

4. **Теория** обработки металлов давлением / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин и др.; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

5. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1968, 400 с.

6. **Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2018. № 6. С. 23—28.

*Валерий Иванович Платонов, канд. техн. наук,
mpf-tula@rambler.ru;
Павел Витальевич Романов;
Владимир Николаевич Чудин, д-р техн. наук*



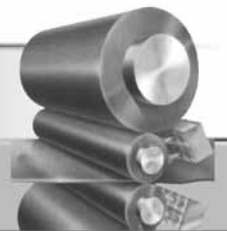
ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,
тел.: (495) 785-6069,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru



УДК 621.746+621.771

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-9-425-428

О.С. Лехов (Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург),
М.М. Шевелев (ОАО "Уральский трубный завод", г. Екатеринбург)

Напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации при получении сталемедных трехслойных биметаллических полос

Описаны основные нагрузки, действующие на бойки установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении сталемедных трехслойных биметаллических полос. Изложена методика определения температуры и термоупругих напряжений в бойках установки с использованием пакета ANSYS. Описаны граничные условия для определения температурных полей в бойках установки при получении биметалла медь—сталь—медь. Представлены закономерности распределения в бойках температуры и термоупругих напряжений при обжатии сталемедного биметаллического слитка и на холостом ходу. Приведены величины и закономерности распределения суммарных напряжений от силы обжатия и температурной нагрузки при получении сталемедных трехслойных биметаллических полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: боек; установка; непрерывное литье; трехслойный биметалл; температура; обжатие; деформация; напряжение.

The main loads acting on the anvils of installation of the combined process of continuous casting and deformation during the production of steelcopper three-layer bimetallic strips are described. The method for determining of the temperature and thermoelastic stresses in anvils of installation using the ANSYS package is presented. The boundary conditions for determining of the temperature fields in anvils of the installation during the production of copper—steel—copper bimetals is described. The regularities of the distribution in anvils of temperature and thermoelastic stresses during reduction of steelcopper bimetallic ingot and at idle are presented. The values and regularities in the distribution of total stresses from the reduction force and thermal loads when producing steelcopper three-layer bimetallic strips on installation of the combined process of continuous casting and deformation are given.

Keywords: anvil; installation; continuous casting; three-layer bimetals; temperature; reduction; deformation; stress.

Широкое применение в различных областях промышленности находят коррозионно-стойкие, антифрикционные и электротехнические биметаллы сталь—медь. Их использование позволяет не только повысить надежность и долговечность большого класса деталей и оборудования, но и достичь существенной экономии дорогостоящих цветных металлов [1, 2]. В связи с этим необходимы создание и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов и оборудования на заводах цветной металлургии и улучшение качества непрерывных биметаллических полос [2]. Для производства биметаллических полос может быть эффективно использована установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [2, 3].

Основными и наиболее нагруженными элементами установки непрерывного литья и деформации являются бойки, которые во время рабочего хода одновременно вытягивают затвердевшую медную оболочку с жидкой фазой из кристаллизатора, формируют биметаллический слиток, обжимают его за один проход до размеров готового биметаллического листа

и выполняют калибровку. При этом во время рабочего хода в бойках на участке формирования биметаллического слитка возникают напряжения от температурной нагрузки, а на участке циклической деформации биметалла — суммарные напряжения от силы обжатия и температурной нагрузки. Таким образом, для обоснованного выбора конструкции и материала бойков необходимо поставить и решить задачу определения напряженного состояния бойков при получении на установке биметаллических полос.

Геометрия бойка, принятая для расчета, показана на рис. 1. Материал бойка — сталь 45ХНМ. Толщина бойка по верхней поверхности 70 мм; длина наклонной части бойка 220 мм, а калибрующего участка 60 мм; угол наклона рабочей поверхности бойка 12,5°. Теплофизические свойства для данной марки стали даны в работе [3].

На первом этапе расчета необходимо определить напряжения в бойках установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации от силы обжатия сталемедного биметаллического слитка. Для этой цели решена задача упругости методом конечных элементов в объемной постановке с использованием пакета ANSYS [3]. Схема нагружения бойка приведена на рис. 2.

Эпюра контактных напряжений получена в результате расчета напряженно-деформированного состояния металла плакирующих слоев из меди толщиной 1 мм [2].

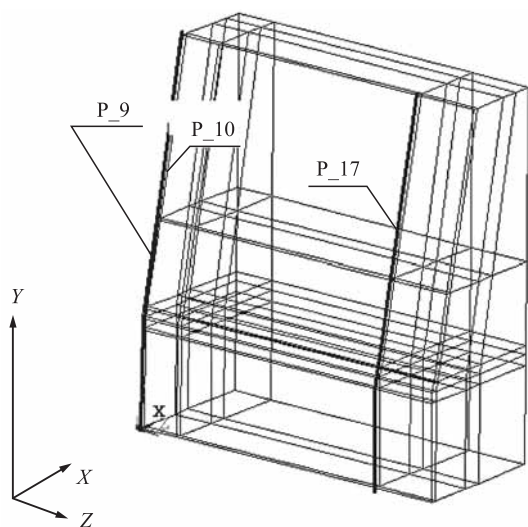


Рис. 1. Расчетная схема бойка с характерными линиями по его высоте: линия P₁₀ находится от линии P₉ на глубине 5 мм

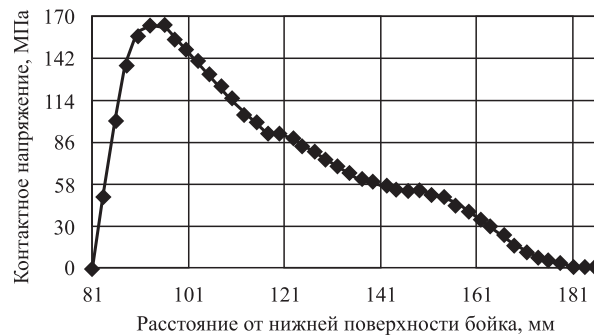


Рис. 2. Схема нагружения бойка

Рис. 3 характеризует распределение осевых (SX , SY , SZ) и эквивалентных ($SEQV$) напряжений от силы обжатия на контактной поверхности бойка. Напряжения в направлении осей X и Y сжимающие и достигающие максимальных значений в области очага деформации -162 МПа и 135 МПа соответственно. Однако напряжения по оси Z растягивающие с максимальным значением 137 МПа.

На втором этапе расчета необходимо определить напряженное состояние бойков от температурной нагрузки. Для расчета термоупругих напряжений в бойках установки следует в каждый момент времени определить температуру во всех узлах конечно-элементной сетки, а затем и температурные деформации и напряжения. Температурное поле бойков определяется решением задачи нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

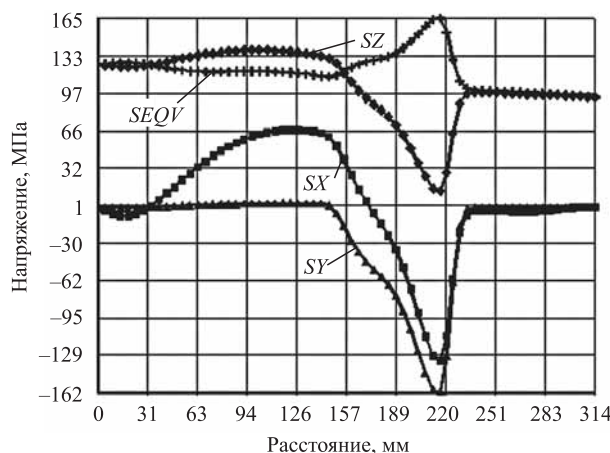


Рис. 3. Характер распределения напряжений вдоль линии P₉ от воздействия на боек без каналов силы обжатия

Такая схема выполнения расчетов повторяется и реализована в одном из модулей пакета ANSYS [3].

При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

— на контактную поверхность бойка во время обжатия биметаллического слитка действует плотность теплового потока 9 МВт/м^2 [3];

— во время холостого хода эффективный коэффициент теплоотдачи принят равным $2000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ [3].

Расчет показал, что во время обжатия биметаллического слитка контактная поверхность бойка нагревается до температуры $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и далее на холостом ходу при охлаждении его водой температура бойка на глубине $2...3 \text{ мм}$ снижается до $140 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчета термоупругих напряжений, возникающих на контактной поверхности бойка при обжатии сталемедного биметаллического слитка, приведены на рис. 4.

Максимальные сжимающие термоупругие напряжения возникают на контактной поверхности и по оси симметрии бойков в направлении осей Z и Y , которые соответственно равны -304 и -292 МПа (см. рис. 4).

Представляет интерес характер распределения термоупругих напряжений в бойке при охлаждении его водой на холостом ходу. Установлено, что термоупругие напряжения на контактной поверхности бойка растягивающие, максимальные значения в направлении осей Z и Y 144 и 136 МПа соответственно.

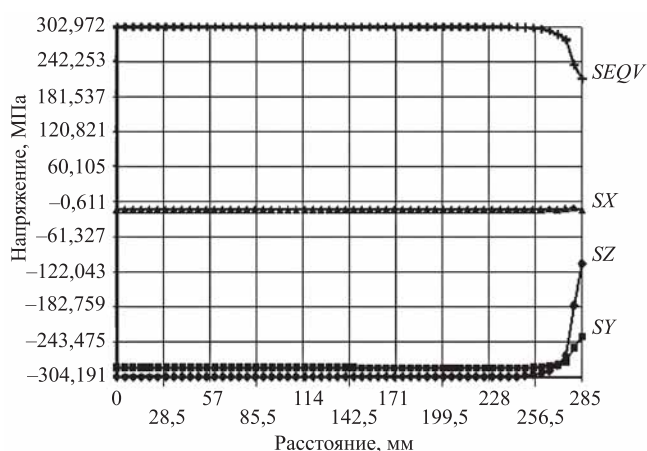


Рис. 4. Характер распределения напряжений на контактной поверхности бойка от воздействия на боек температурного поля при обжатии сталемедного слитка

На рис. 5 показаны закономерности распределения осевых суммарных напряжений в бойках установки от силы обжатия и температурной нагрузки.

Максимальные значения -427 и -422 МПа соответственно, суммарные напряжения SU и SZ достигают на контактной поверхности в зоне очага деформации

Таким образом, бойки установки при получении сталемедных трехслойных биметаллических полос испытывают знакопеременную нагрузку, что снижает срок их службы. Если учесть, что температура наружной поверхности плакирующих слоев из меди составляет $850 \text{ }^\circ\text{C}$, то температура контактной поверхности бойков без каналов при получении биметалла медь—сталь—медь может достигать $500 \text{ }^\circ\text{C}$, а термоупругие напряжения при этом равны -760 МПа [3].

В связи с этим бойки опытно-промышленной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод» изготовлены из стали $4X4BMFC$ с повышенной стойкостью к образованию сетки разгара, предел текучести которой при температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет 1309 МПа , что значительно превышает значение термоупругих напряжений в бойках при этой температуре.

Заключение. Поставлена и решена задача определения напряженного состояния системы бойки—биметалл при получении сталемедных биметаллических полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и дефор-

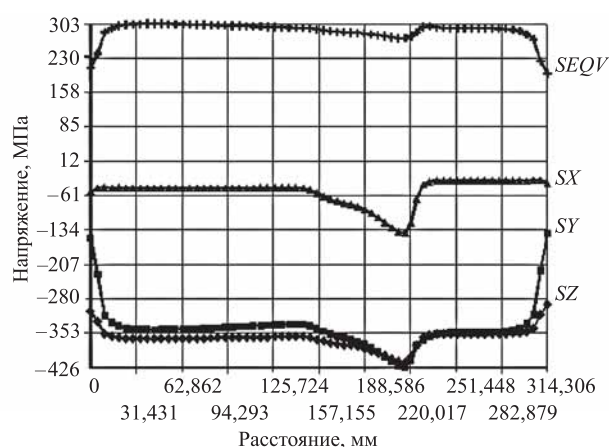


Рис. 5. Характер распределения напряжений в бойке вдоль линии P_9 от силы обжатия и температурной нагрузки

мации. Установлены закономерности распределения в бойках термоупругих и суммарных напряжений от силы обжатия и температурной нагрузки. Результаты работы можно использовать для обоснованного выбора материала бойков установки при получении сталемедных трехслойных биметаллических полос.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Е.В. Основные направления развития технологии производства биметаллов // Теория и технология процессов пластической деформации: сб. тр. науч.-техн. конф. М.: Изд-во МИСИС, 1997. С. 111—119.

2. Лехов О.С., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. Исследование процесса получения биметалла медь—сталь—медь на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. № 1. С. 30—34.

3. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Напряжения в системе бойки—полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. 125 с.

*Олег Степанович Лехов, д-р техн. наук,
mxlehov38@yandex.ru;*

Максим Михайлович Шевелев, канд. техн. наук



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

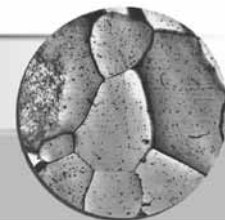
Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 669.017

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-9-429-432

В.С. Муратов, Е.А. Морозова, Н.С. Якимов
(Самарский государственный технический университет)

Формирование структуры и свойств комплексно-легированной литой стали*

Исследованы закономерности влияния изменения химического состава и режимов термической обработки на структуру и комплекс механических свойств литой стали ВКЛ-3 (12Х2НВМЛ). Получена экспериментальная плавка стали с повышенным содержанием хрома, кремния, никеля и молибдена. Сталь данного состава обладает пониженными пластичностью и вязкостью. При этом экспериментальная плавка стали позволяет моделировать ликвационные зоны с повышенным содержанием легирующих элементов в стали типового состава, обладающей химической и структурной неоднородностью и неоднородностью пластичности и вязкости. Показано, что применение окончательной термической обработки со скорректированными режимами (в частности, повышенными температурой и длительностью отпуска) позволяет увеличить пластичность стали до требуемых значений, однако ударная вязкость при этом не достигает необходимого уровня. Даны рекомендации по поддержанию содержания легирующих элементов вблизи нижнего допустимого предела.

Ключевые слова: литая сталь; ликвация; химический состав; термическая обработка; микроструктура; пластичность; вязкость.

The patterns of the effect of change in the chemical composition and modes of heat treatment on the structure and complex of mechanical properties of cast steel VKL-3 (12Kh2NVML) are studied. The experimental melting of steel with increased content of chromium, silicon, nickel and molybdenum is obtained. The steel of this composition has reduced ductility and toughness. At the same time, experimental steel melting makes it possible to model segregation zones with increased content of alloying elements in the steel of typical composition that has chemical and structural heterogeneity and heterogeneity of ductility and toughness. It is shown that the use of the final heat treatment with the adjusted modes (in particular, increased temperature and time of tempering) allows increasing the ductility of the steel to the required values, but the impact strength does not reach the required levels. The recommendations for maintaining of the alloying elements content near the lower allowable limit are given.

Keywords: cast steel; segregation; chemical composition; heat treatment; microstructure; ductility; toughness.

Для изготовления отливок деталей авиастроения методами точного литья по выплавляемым моделям и в керамические формы по постоянным моделям широко применяют сталь ВКЛ-3 (12Х2НВМЛ). Данная сталь относится к мартенситному классу и является сталью средней прочности, обладает удовлетворительной жидкотекучестью, не склонна к образованию трещин и имеет линейную усадку ~2 %.

Известно, что по химическому составу литейные стали близки к деформируемым (той же системы легирования), хотя содержание отдельных элементов (кремния, углерода и др.) может быть повышенным. Режимы термической обработки литейных и деформируемых сталей часто не совпадают. Различия заключаются в проведении дополнительной предварительной термической обработки для литейных сталей, а также режимах окончательной термической обработки [1–3]. Последнее обусловлено сохраняющейся ликвационной неоднородно-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 19-38-90172.

стью литого состояния, что может приводить к повышенной твердости литой стали [4–8]. Увеличение твердости может носить локальный характер в зонах повышенного содержания отдельных элементов [9, 10], тем более, что сталь ВКЛ-3 содержит элементы, склонные к ликвации — углерод, вольфрам, молибден, хром, кремний. Различие в содержании элементов в разных участках сплава из-за дендритной и зональной ликвации может достигать 5 % в зависимости от их содержания в стали.

Для обеспечения требуемых пластичности и вязкости увеличивают температуру отпуска по сравнению с деформируемой сталью идентичного состава [11, 12]. Однако возможное снижение прочности при этом отрицательно сказывается на надежности и экономичности конструкций в целом. При этом отсутствуют исследования, опровергающие факт, что в отдельных локальных зонах отливки вязкость и в этом случае может не достигать требуемых значений.

Цель работы — исследование закономерностей влияния изменения химического состава и режимов термической обработки на структуру и комплекс механических свойств стали ВКЛ-3.

Выплавку стали проводили в индукционной печи с основной футеровкой в вакууме.

Механические свойства определяли по стандартным методикам на образцах, вырезанных из отдельно отлитых треновидных заготовок длиной 250 мм и максимальным диаметром 60 мм (рис. 1).

Отливку заготовок выполняли в горячие керамические формы, заливку осуществляли в рабочем пространстве печи при разливке стали.

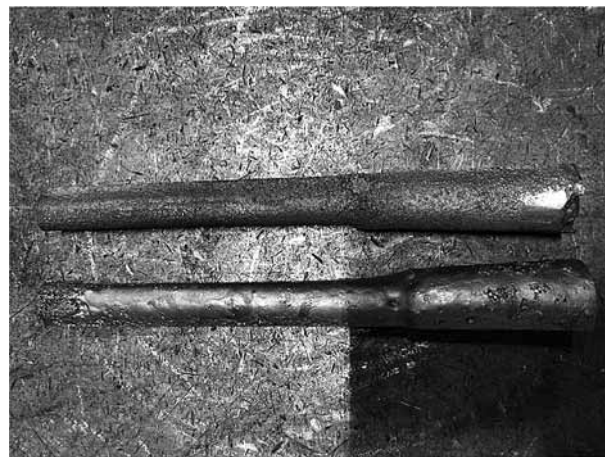


Рис. 1. Треновидные заготовки для последующего определения механических свойств

Химический состав стали определяли на спектрометре S5 Solaris CCD Plus.

В табл. 1 приведено содержание легирующих элементов в стали ВКЛ-3, полученной в ходе типовых и экспериментальной плавки. Содержание элементов стали типовых плавки соответствует нормативным документам. Сталь экспериментальной плавки имеет в составе повышенное содержание хрома, кремния, никеля и молибдена. Содержание углерода в ней соответствует максимально допустимому пределу.

Отлитые треновидные заготовки подвергали предварительной термической обработке по режиму: температура отжига (900 ± 10) °С, время выдержки 2 ч, охлаждение с печью до 680 °С, далее — на воздухе. Затем образцы для механических испытаний, вырезанные из заготовок, подвергали окончательной термической обработке по исследуемым режимам (табл. 2).

1. Содержание легирующих элементов в стали ВКЛ-3 типовых и экспериментальной плавки, % мас.

Плавки	C	Mn	Cr	Si	Ni	Mo	W
Типовые	0,09...0,16	0,3...0,7	1,9...2,4	0,2...0,6	0,8...1,2	0,2...0,3	1,00...1,40
Экспериментальная	0,15...0,16	0,59...0,65	2,50...2,56	0,77...0,95	2,11...2,20	0,46...0,47	1,00...1,05

Примечание. Содержание примесей, % мас.: $\leq 0,025$ S; $\leq 0,025$ P; $\leq 0,08$ Al; $\leq 0,3$ Cu.

2. Исследуемые режимы термической обработки стали ВКЛ-3

Номер режима термической обработки	Температура закалки, °С	Время выдержки при температуре закалки, мин	Температура отпуска, °С	Время выдержки при температуре отпуска, мин
1	900 ± 10	15	550 ± 10	40
2		90		600 ± 10
3	880 ± 10			

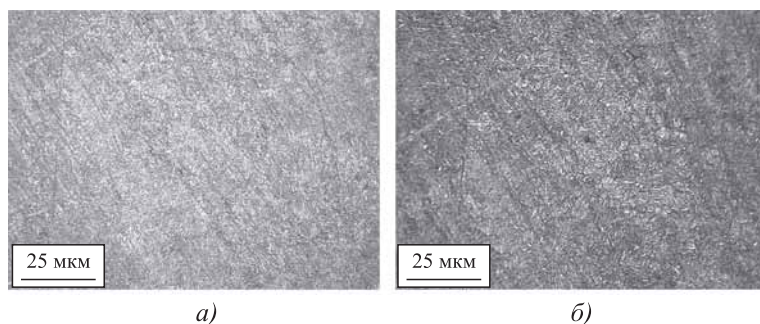


Рис. 2. Микроструктуры стали ВКЛ-3 экспериментальной плавки после окончательной термической обработки по режиму № 1

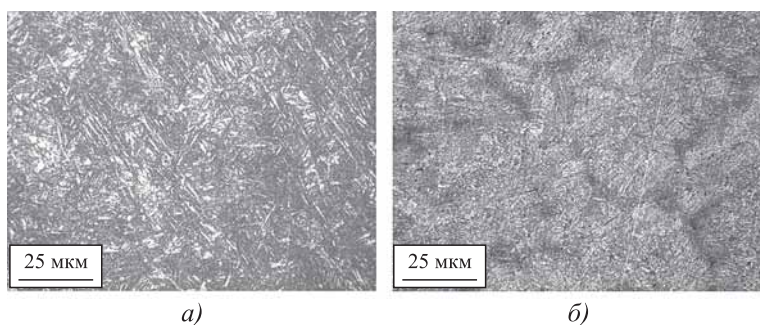


Рис. 3. Микроструктуры стали ВКЛ-3 экспериментальной плавки после закалки по режимам № 1 (а) и № 3 (б)

Режим № 1 является типовым, его используют при термической обработке деталей. В режимах № 2 и № 3 назначали скорректированные температурные и временные параметры.

На рис. 2 и 3 приведены микроструктуры стали ВКЛ-3 экспериментальной плавки. В структуре стали поры либо отсутствуют, либо имеют допустимые размеры (см. рис. 2). После закалки сталь имеет микроструктуру игольчатого мартенсита (см. рис. 3, а), выявляются признаки дендритной ликвации (см. рис. 3, б).

В табл. 3 приведены механические свойства стали ВКЛ-3. Значения характеристик свойств для типовых плавки по режиму № 1

указаны для партий деталей, прошедших контроль и признанных полностью годными. Однако отдельные партии деталей имеют пониженный уровень характеристик пластичности и ударной вязкости и отбраковываются. Как было отмечено ранее, причиной этого является ликвационная неоднородность литой стали. Ранее указаны и существующие рекомендации по увеличению температуры отпуска, направленные на увеличение пластичности и вязкости стали.

Экспериментальная плавка стали ВКЛ-3 позволяет моделировать ликвационные зоны с повышенным содержанием ряда легирующих элементов, а проведением скорректированных режимов термической обработки проверяется возможность увеличения пластичности и вязкости таких зон. Из данных табл. 3 следует, что ни увеличение длительности выдержки при температурах закалки и отпуска, ни снижение температуры закалки, ни повышение температуры отпуска не исправляет ситуацию.

Режим № 3 позволяет достигать требуемый уровень характеристик пластичности и твердости, однако ударная вязкость не достигает необходимого уровня.

Сопоставление химического состава партий типовых отливок из стали ВКЛ-3 показало, что отбраковывались по причине недопустимо низких значений пластичности и вязкости отливки, имеющие в составе стали количество легирующих элементов, близкое к верхнему допустимому пределу их содержания. В то же время отливки из стали с количеством легирующих элементов, близким к нижнему допустимому пределу, имели достаточный уровень пластичности и вязкости.

3. Механические свойства стали ВКЛ-3 после различных режимов термической обработки

Режим термической обработки, плавка	σ_B , МПа	δ	φ	КСУ, кДж/м ²	НВ, МПа
		%			
№ 1, типовая	1120...1250	9,0...11,0	31,0...41,0	450...675	3180...3630
№ 1, экспериментальная	1390	8,0	19,5	250	4150
№ 2, экспериментальная	1310	6,0	8,5		
№ 3, экспериментальная	1010	9,5	32,0	270	3210
Требование нормативного документа	≥1000	≥9,0	≥30,0	≥400	2850...3880

Заключение. Установлено, что пониженная вязкость стали ВКЛ-3, обусловленная повышенным содержанием легирующих элементов, не может быть устранена коррекцией режимов термической обработки, в частности, увеличением температуры и продолжительности отпуска. Вследствие этого, следует тщательно апробировать основанные на данном подходе рекомендации, направленные на снижение твердости и повышение пластичности и вязкости литой стали с ликвационной неоднородностью химического состава. В структурных зонах стали ВКЛ-3 с повышенным содержанием легирующих элементов увеличение вязкости может оказаться недостаточным.

Для получения отливок требуемого качества необходимы технологические меры, уменьшающие ликвационную неоднородность стали, в частности, целесообразно поддерживать содержание легирующих элементов вблизи нижнего допустимого предела.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Study** on Spheroidization and Related Heat Treatments of Medium Carbon Alloy Steels / S.R. Harisha, Sharma Sathyashankara, U. Achutha Kini, Gowri Shankar M.C. / MATEC Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814402008.RiMES> 2017.
2. **Rokicki P.** Induction hardening of tool steel for heavily loaded aircraft engine components // Arch. Metall. Mater. 2017. 62. 1. 315–320.
3. **In-situ** quench and tempering for microstructure control and enhanced mechanical properties of laser clad AISI 420 stainless steel powder on 300M steel substrates / Shi Da Suna, Daniel Fabijanic, Cameron Barra et al. // Surface & Coatings Technology. 2018. 333. 210–219.
4. **Братухин А.Г., Лукин В.И., Лазько В.Е.** Особенности изготовления литосварных конструкций из высокопрочных сталей. 1992. URL: <http://www.viam.ru/public/1992-201218> (дата обращения 05.06.2020).
5. **Кудря А.В.** Роль разномасштабных структур в обеспечении пластичности и вязкости структурно-неоднородных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 5. С. 18–23.
6. **Кудря А.В., Никулин С.А., Николаев Ю.А.** Факторы неоднородности вязкости низколегированной стали 15X2НМФА // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2009. № 9. С. 23–28.
7. **Скородумов С.В.** Сопоставление структуры и вязкости конструкционных сталей: дис. ... канд. техн. наук. Нац. исслед. технол. ун-т "МИСИС". М., 2011. 187 с.
8. **Фазовый** состав и тонкая структура литой стали Р18 электрошлакового переплава / Ю.П. Хараев, О.А. Власова, А.М. Гурьев, Н.А. Попова, Э.В. Козлов // Ползуновский вестник. 2007. № 3. С. 157–161.
9. **Емельянов К.И., Голод В.И.** Влияние структурной микронеоднородности на развитие дендритной ликвации при кристаллизации стали // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политех. ун-та. 2013. 3 (178). С. 163–168.
10. **Нго Нгок Ха.** Оценка неоднородности разномасштабных структур в крупных поковках из улучшаемой стали 38ХНЗМФА и ее влияние на разрушение: дис. ... канд. техн. наук. Нац. исслед. технол. ун-т "МИСИС". М., 2019. 129 с.
11. **Земзин В.Н., Шпрон Р.З.** Термическая обработка и свойства сварных соединений. Л.: Машиностроение, 1978. 366 с.
12. **Лазько В.Г., Лазько В.Е., Овсянников Б.М.** Зависимость между уровнем прочности и вязкостью для среднелегированных конструкционных сталей // Проблемы прочности. 1976. № 7. С. 113–117.

*Владимир Сергеевич Муратов, д-р техн. наук,
ftf@samgtu.ru;*

*Елена Александровна Морозова, канд. техн. наук;
Николай Сергеевич Якимов*

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. <http://www.mashin.ru>
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 09.07.2020. Подписано в печать 01.09.2020. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солишнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.