

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ НАН БЕЛАРУСИ В СОТРУДНИЧЕСТВЕ С ИНСТИТУТОМ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ КИТАЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Покровский А.И., Петренко В.В., Жукова А.А.

Физико-технический институт НАН Беларуси

Zhang Shi-Hong, Cheng Ming, Xu Yong

IMR CAS

Dehui Guan Ph.D, Head of the Personnel and International Cooperation Department.

*Если ты доволен другом, в Поднебесном мире не
окажется ничего, что имело бы недостаток. Если в
общих делах царит безмятежность, в Поднебесном
мире ничто не покажется враждебным.*

Конфуций

Введение

Физико-технический институт НАН Беларуси и Институт исследования металлов (ИМР) Китайской академии наук (г. Шеньян, КНР), вот уже несколько лет сотрудничают в области обработки машиностроительных материалов. Тематика сотрудничества касается получения различных машиностроительных деталей пластическим формообразованием (штамповкой и прокаткой). Это теоретические, экспериментальные исследования, разработка технологий и оборудования по двум основным направлениям: 1) гидропрессование и импульсная гидроударная штамповка листовых материалов; 2) поперечно-клиноватая прокатка осесимметричных изделий.

Основным технологическим приемом, которым мы воздействуем на материал, является пластическая деформация, а ключевой изучаемой характеристикой – пластичность (от греческого слова *plastikos* – пригодность для лепки, податливость). Общепринятым определением пластической деформации является необратимое изменение формы изделий при различных термомеха-

нических воздействиях, причем без разрушений в виде различных макро- и микроскопических повреждений [1].

Как известно, основные технологические приемы обработки металлов давлением изучены уже очень давно, в настоящее время исследования и разработки в области пластической деформации ведут сотни лабораторий, а десятки тысяч предприятий выпускают миллионными тиражами штампованные изделия.

Тем не менее, проблемы получения качественных изделий из трудно деформируемых материалов и материалов с низкой пластичностью остаются весьма актуальными и в настоящее время. Наиболее остро это проявляется в наиболее передовых областях техники, где детали работают в условиях высоких скоростей и температур, испытывают экстремальные напряжения и перегрузки.

Речь идет в первую очередь об изделиях авиационной и аэрокосмической промышленности, где широко используются высокопрочные материалы класса «super alloy», обладающие повышенными прочностными характеристиками

(пределом прочности при растяжении, пределом ползучести, длительной прочностью).

Негласное, но острое соревнование характеристик новых высокопрочных материалов постоянно идет среди различных фирм передовых стран, причем победителя может определить преимущество всего в несколько единиц МПа или десятых долей процента. Чтобы понять, насколько важны эти показатели, приведем такой пример. Известно, что боевые характеристики современного истребителя определяются не столько вооружением, сколько в значительной мере показателями длительной прочности изделия «лопатка турбины двигателя»; от качества (и технологии изготовления) которой зависит маневренность, скорость, живучесть и, в конечном счете – превосходство в воздухе летательного аппарата.

К сожалению, «обратной стороной медали» большинства высокопрочных материалов является пониженная технологическая пластичность, что предопределяет значительные сложности при получении их методами обработки давлением.

Это извечная производственная дилемма на практике выглядит так: менеджер высшего звена анонсирует изделие с суперхарактеристиками и требует от своих изготовителей обновления модельного ряда, конструктор – соответственно, закладывает в чертежи деталей последние новинки материаловедения, обладающие суперпрочностью. В результате технологу приходится ломать голову, как изготовить такие изделия, почему, например, при штамповке образуются трещины (рис. 1), а при прокатке возникает огромное сопротивление деформации, а исследователям экспериментировать с температурно-силовыми режимами и искать оптимальные параметры пластического формообразования.

Решению подобных проблем и посвящено сотрудничество ФТИ НАН Беларуси (г. Минск) и IMR CAS (г. Шеньян). Материалами для исследований служат сплавы на алюминиевой, железной, никелевой основах, которые применяются в основном в аэрокосмической промышленности и обладают высокой прочностью, но пониженной пластичностью и трудно деформируемы.

О преимуществах методов обработки давлением

Может возникнуть логичный вопрос: неужели технология обработки металлов давлением является единственной при получении такого рода деталей. Конечно же, нет, ведь существует множество литейных и механообрабатывающих технологий, а при наличии современных 3D станков, придать изделию сложнейшую форму не составляет труда.

Однако преимуществами обработки давлением являются идеальная воспроизводимость геометрической формы и размеров от детали к детали, высокая производительность и возможности автоматизации, малые припуски на обработку, оптимальное расположение волокон в структуре металла, которые не перерезаются в отличие от механической обработки (рис. 2). Кроме того материалы, используемые в авиационной промышленности, как правило недешевы (например, сплав для лопаток турбин содержит более 50 % никеля – весьма дорогого легирующего элемента), а переводить значительное количество металла в стружку – расточительно, так как коэффициент использования металла (КИМ) при этом невысок, 0,3–0,5. Методы же обработки металлов давлением чрезвычайно экономичны по расходу металла, КИМ достигает 0,7–0,8 (рис. 2), а в отдельных случаях – 0,95. Таким образом, методы обработки давлением являются отнюдь не единственными, но в большинстве случаев – оптимальными.



а



б

Рис. 1. Примеры трещин, возникших при:
а - штамповке деталей авиационной обшивки
б - раздаче трубчатой заготовки детали выхлопного тракта автомобиля

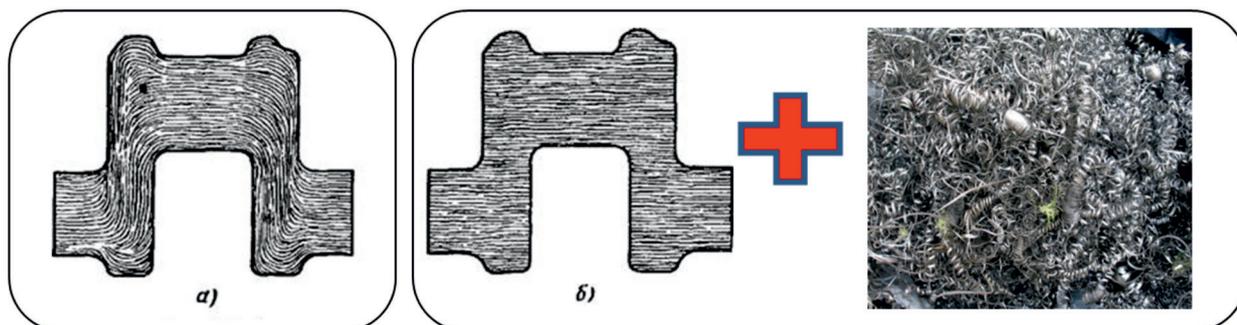


Рис. 2. Сравнение макроструктуры и коэффициента использования металла при получении одной и той же детали: методом пластической деформации (а) и механической обработкой (б): а) $KИМ=0,8$, б) $KИМ= 0,3$ (из-за значительного количества отходов в виде стружки)

Определяющее влияние схемы напряженного состояния при пластическом формообразовании хрупких материалов

Как известно, пластическая деформация представляет собой сложный процесс, а на величину предельной деформации, которую можно достичь без разрушения, влияют многие факторы (в частности: структура, механические характеристики металла, температурно-скоростные условия деформирования и др.). Наибольшее влияние на значение предельной деформации оказывают схемы напряженного состояния, существенно отличающиеся при различных процессах обработки давлением.

Первые попытки установить связь между пластичностью и напряженным состоянием относятся к концу 19-го века. В 1911г. Т. Карман, Р. Беккер теоретически рассчитали и экспериментально подтвердили, что в условиях неравномерного всестороннего сжатия даже хрупкие материалы могут деформироваться пластически. В частности, проводили эксперименты на сжатие с каррарским мрамором и песчаником, которые при испытаниях в обычных условиях разрушались, не успев проявить пластических свойств из-за низкого сопротивления деформации. Однако, в случае, если образцы из мрамора испытывали в условиях неравномерного всестороннего сжатия, например, в жидкости (глицерине), находящейся под высоким давлением (более 80 МПа), они обнаруживали пластические свойства (удлинение до 9 %). Профессор Гарвардского университета (США) П.В. Бриджмен, проводя исследования пластичности хрупких веществ, показал [2, 3], что наибольшая предельная деформация дости-

гается при отсутствии растягивающих и увеличении сжимающих напряжений. Как известно, результаты исследования пластичности хрупких веществ и послужили одним из оснований для присуждения в 1946 г. П.В. Бриджмену Нобелевской премии по физике.

Создание школы Физико-технического института в области обработки давлением труднодеформируемых материалов

В ФТИ исследования в области пластической деформации труднообрабатываемых материалов начались в 40-е годы 20-го века. В это время ФТИ возглавил академик АН БССР С.И. Губкин. Он сформулировал базовые положения в области пластической деформации, расширил представления о напряженном и деформированном состоянии тел при конечных пластических деформациях, внес огромный вклад в математическую теорию пластичности. Согласно теории С.И. Губкина, для обеспечения пластичности в хрупких телах необходимо наличие трехосного сжатия во всем объеме заготовки, причем, чем резче будет выражена схема всестороннего сжатия, тем в большей мере проявится пластичность материала. Кроме того, должны быть обеспечены условия возможно более равномерного протекания деформации [4, 5].

Дальнейшее развитие теория пластичности и ее основные аспекты (деформируемость, сопротивление деформированию, термомеханические режимы процессов горячего, полугорячего и холодного деформирования) получила в работах академика Северденко В.П. [6]. Академиками Клубовичем В.В. и Степаненко А.В. разработаны теория, способы и оборудование для прокатки

и гидропрессования металла с дополнительным воздействием ультразвука [7].

Создание и развитие в Физико-техническом институте технологий пластического деформирования через промежуточные среды. В 60-х годах 20-го века. В.П. Северденко, В.С. Мураком, В.Г. Кантиным, Э.Ш. Суходревым была разработана принципиально новая схема прямого выдавливания с использованием промежуточной среды, которое они назвали «горячее гидродинамическое выдавливание» (ГГДВ) [8]. В качестве промежуточной квазижидкой среды использовали вкладыш из электродного графита, который под воздействием пуансона разрушался, превращаясь в порошок, который заполнял зазор между заготовкой и контейнером, а дальнейшее выдавливание заготовки происходило в псевдожидкой порошковообразной графитовой оболочке.

Следует особо отметить, что основной целью разработчиков было избежать прямого контакта деформируемой заготовки со стенками контейнера, добиться максимальной изоляции заготовки от поверхности матрицы во время ее истечения. Главным фактором, определяющим высокую эффективность течения заготовки из трудно деформируемых материалов – считалось образование промежуточного псевдожидкого слоя у стенок прессовой матрицы. В дальнейшем эти работы были продолжены Покровским А.И. применительно к обработке такого трудно деформируемого материала, как чугун [9].

Создание и развитие в Физико-техническом институте технологий импульсной гидроударной листовой штамповки через промежуточную среду. Одновременно с работами по горячему выдавливанию, начиная с 1966 г., в ФТИ проводились эксперименты по холодной штамповке через промежуточные (гидравлические) среды. Их особенностью был импульсный характер нагружения – кратковременное высокоскоростное (порядка микросекунд) воздействие различной природы (ударное, магнитное, электрическое) на материалы с целью их формообразования [10].

Для научного обеспечения этого направления в ФТИ была создана лаборатория физико-химической механики, а ее руководителем назначен канд. техн. наук В.Н. Чачин (1930–1994 гг.) (впоследствии директор ФТИ, лауреат государственной премии, академик, ректор БПИ). Группой гидроударной обработки (Г.К. Седяко, В.С. Петраковский и др.) в 70-е годы разработан принципиально новый метод импульсной гидроударной листовой штамповки, схема которого представлена на рис. 3.

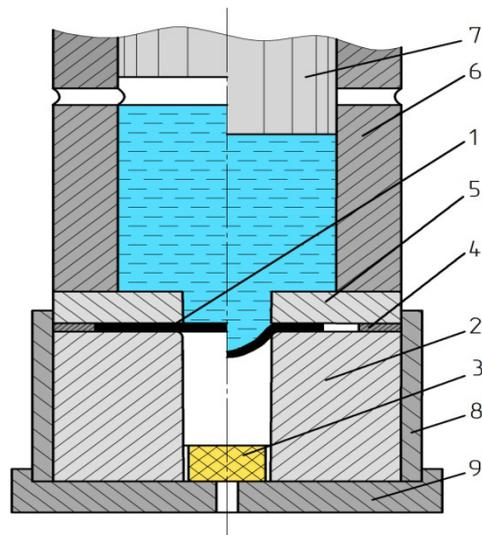


Рис. 3. Схема импульсной гидроударной штамповки через промежуточную гидравлическую среду (на примере получения детали типа полусферы). Слева от осевой линии – плоская листовая заготовка, справа – отштампованное готовое изделие:

1 – заготовка, 2 – матрица, 3 – амортизатор, 4 – центрирующая шайба, 5 – прижим, 6 – рабочая камера, 7 – боек, 8 – обойма, 9 – зажимная плита

Штамповка производилась импульсом высокого давления, создаваемого в результате удара быстро движущегося бойка по замкнутому объему жидкой (станочная эмульсия) или эластичной среды (полиуретан), заполняющей рабочую камеру пресса. Источником энергии являлся сжатый воздух цеховой типовой пневматической системы. Особенности процесса – кратковременность приложения нагрузки (300–600 мкс) и отсутствие пуансона, роль которого выполняла передающая среда. Коллектив группы гидроударной обработки оказался творческим, достаточно сказать, что в вышедшем в 1978 г. библиографическом указателе трудов [11], выполненных в ФТИ по этой тематике, насчитывается около 300 публикаций.

В практическом плане были разработаны быстропереналаживаемые технологии листовой штамповки для получения широкого круга изделий из листового металла толщиной до 3 мм. Было показано, что обработке успешно подвергаются алюминий, медь и их сплавы, латунь, углеродистая, легированная, нержавеющая, жаропрочная стали, титан, благородные металлы.

Достоинствами технологии являлись возможность быстрой переналадки, недорогая оснастка (до 3 раз дешевле обычной), высокая эффективность при обработке труднодеформируемых

материалов. Постепенно научные и технологические наработки начали реализовываться при изготовлении собственного оригинального оборудования. Была разработана линейка гидроударных прессов с максимальной энергией удара до 25 кДж, имеющих компактные габариты (всего 2,6×2,0 м в плане, высотой 3,6 м) и удобную для транспортировки относительно небольшую массу (до 9 т), показанные на рис. 4.

В качестве рабочей жидкости использовали широко применяемую технологическую эмульсию – обычную смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ). Важно, что энергоносителем являлся сжатый воздух цеховой пневматической системы давлением до 0,63 МПа, что гораздо проще и безопаснее штамповки электрическим разрядом или взрывчатыми веществами. Оборудование создавалось мобильным; такой пресс можно было быстро перевезти на новую площадку, смонтировать в течение суток и, при наличии компрессора, начать работу практически в любых условиях.

Для практического использования главными преимуществами технологии гидроударной штамповки оказались быстрая переналадка и

освоение новых моделей малыми сериями. Они обеспечивали безусловный успех тех проектов, когда требовалось быстрое освоение производства малых серий новых образцов авиационной и военной техники.

Прессы позволяли производить практически все операции холодной листовой штамповки: вытяжку из плоской и пространственной заготовки, раздачу труб и полых заготовок, обжим, формовку, пробивку-вырубку плоских и пространственных деталей, калибровку, отбортовку. Стоит отметить, что многие операции могли быть выполнены совместно за один цикл работы.

Было освоено более сотни различных типов-размеров деталей. Значительная их часть представляла собой чрезвычайно ответственные комплекующие детали для авиационной и военной техники: корпуса «черных ящиков» самолетов, детали обогрева крыла, детали аэродромного оборудования, корпуса гироскопов подводных лодок. Выполнялись и эксклюзивные заказы, в частности, значительная часть дверной фурнитуры для здания парламента Венгрии изготовлена по данной технологии. Заказчики лаборатории –

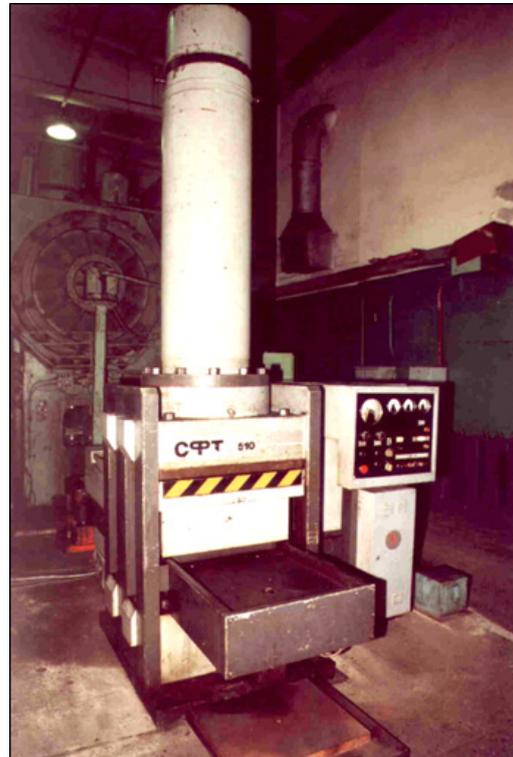


Рис. 4. Разработанные в ФТИ прессы для гидроударной штамповки через промежуточную среду:
 а – модель СФТ-514 для штамповки через полиуретан
 б – модель СФТ-510 для штамповки через станочную эмульсию

Ташкентский авиационный завод, Харьковский авиационный институт, Куйбышевский моторный завод, Красноярский приборостроительный завод, Минский тракторный завод, завод им. Вавилова и др. Некоторые образцы получаемых деталей приведены на рис. 5.

С 2011 г. заведующим лабораторией назначен канд. техн. наук А.И. Покровский. Наиболее весомым достижением лаборатории в эти годы является успешное изготовление опытных образцов одноячеечного сверхпроводящего ниоби-

евого резонатора для ускорителя электронов и позитронов. Эта работа выполнялась совместно с Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия) в рамках международного проекта ILC (International Linear Collider)). Задача состояла в непосредственном изготовлении экспериментальных образцов резонатора из исходных листовых заготовок. Важно было придать заданную чертежом сложную форму составным частям резонатора – полукамерам с изменяемым по профилю радиусом (рис. 6).



Рис. 5. Примеры изделий, изготавливаемых в ФТИ НАН Беларуси импульсной гидроударной штамповкой

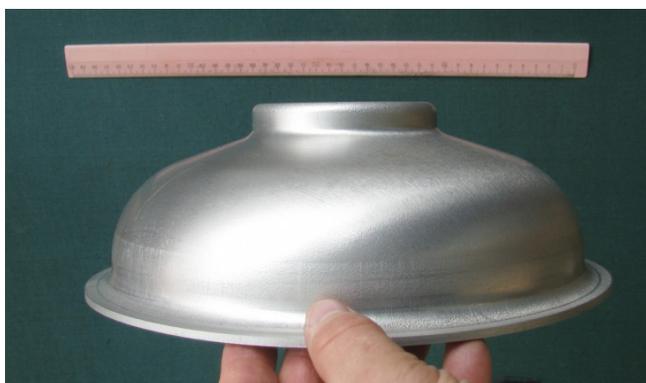


Рис. 6. Внешний вид деталей типа «полукамера» - являющихся составными частями резонатора ускорителя электронов, изготовленных из особо чистого ниобия в ФТИ импульсной гидроударной штамповкой

Именно соблюдение абсолютной идентичности параметров внутренней поверхности резонатора и обеспечивает последующий «разгон» – эффективное и однородное ускорение всего пучка электронов в ускорителе переменным электромагнитным полем. До настоящего времени во всем мире эти изделия выпускались всего лишь несколькими зарубежными хорошо зарекомендовавшими себя фирмами.

Лабораторией высоких давлений ФТИ были успешно изготовлены требуемые элементы резонатора, причем с высочайшей точностью. Отклонения от номинального размера не превысили 0,05–0,1 мм, а значительная часть изделий отштампована без какого-либо отклонения от номинала. Коэффициент выхода годного при штамповке составил идеальную для штамповки цифру – 100 % (брак полностью отсутствовал), что было очень важно, так как ниобий по стоимости дороже серебра. Технология была высоко оценена министром промышленности Республики Беларусь В.М. Вовком (рис. 7). Основные элементы технологии защищены более, чем 100 патентами, некоторые примеры последних патентов приведены в [12–13].

О городе Шеньян. Наши китайские партнеры находятся в городе Шеньян (его старое название Мукден), столице провинции Ляонин. Шеньян входит в десятку крупнейших городов Китая и имеет население около 8 млн. человек. В этом крупнейшем промышленном центре развито многоотраслевое машиностроение, включающее



Рис. 7. Демонстрация процесса импульсной гидроударной штамповки. Слева направо: аспирантка Бакиновская А.А. (научн. сотр.), Вовк В.М. (министр промышленности Беларуси), Петраковский В.С. (вед. научный сотрудник), Покровский А.И. (зав. лабораторией)

производство промышленного оборудования, транспортных средств, электротехники. В городе имеются три аэропорта, расположен головной завод автомобильной компании Brilliance China Auto, объем выпуска только автомобилей BMW (по лицензии) и китайских микроавтобусов достигает 200 тысяч штук в год. Город выглядит как современный американский мегаполис с небоскребами, линиями метро, пятиполосными магистральями и многоуровневыми развязками (рис. 8, + обложка).



Рис. 8. Так выглядит город Шеньян (КНР), где располагается партнер ФТИ – Институт исследования металлов Китайской академии наук

Институт исследования металлов (IMR CAS) и его работы в области пластической деформации металлов. IMR является головным институтом Китайской академии наук в области исследований металлов и технологий их обработки. IMR имеет более высокий статус, чем аналогичные институты других китайских провинций, а о его потенциале можно судить по следующим показателям: численность сотрудников достигает 1000 человек, средний возраст около 40 лет, все научные сотрудники свободно или удовлетворительно владеют английским языком, институт издает несколько научных журналов, при институте создана Национальная лаборатория исследования металлов.

Конкретная тематика сотрудничества между ФТИ и ИМР относится к области пластической деформации металлов и посвящена научным экспериментам и моделированию процессов при гидроформинге (прессовании и штамповке через гидравлические среды) с целью получения различных деталей из листовых и трубчатых заготовок.

Лаборатория гидроформинга ИМР в г. Шеньяне, которой руководит профессор Shi-Hong Zhang, занимается гидропрессованием (по международной терминологии – «hydroforming») изделий сложной конфигурации, как из листовых, так и из трубчатых заготовок (раздача, обжим). Группа профессора Shi-Hong Zhang, помимо фундаментальных исследований пластической деформации, осуществляет научное, конструкторское и технологическое обеспечение получения конкретных деталей для ряда известных фирм («Audi», «Porsche» и др.) по прямым контрактам.

При этом широко используются программы компьютерного моделирования (главным образом «CATIA», а также «ProEngineer», «LSDYNA» и др.), позволяющие заранее оценить штампуемость, заполняемость металлом малых радиусов в форме, вероятность появления трещин и т.д. В использовании этих программ сотрудники ИМР достигли совершенства. Один из примеров используемых программ приведен на рис. 9.

Нужно отметить очень высокую степень публикуемости научных результатов сотрудниками этой группы, причем в самых рейтинговых англоязычных научных журналах. Сам Shi-Hong Zhang является одним из мировых лидеров в области «hydroforming», председатель всемирных комиссий по штамповке и глубокой вытяжке, значительное количество времени проводит за рубежом.

В Китае, и в частности в г. Шеньяне, группа профессо-

ра Shi-Hong Zhang также осуществляет научное обеспечение работ аэрокосмических фирм, например, «Shenyang Aerospace Mitsubishi Motors Engine Manufacturing Co., Ltd.» (SAME), «Shenyang Aircraft Corporation» (SAC). Это крупные корпорации, общее число сотрудников в которых превышает 20 тыс. человек, занимаются производством гражданской и военной авиатехники и изделий для космоса.

Развитие сотрудничества между ФТИ и ИМР. Первый раз сотрудники ФТИ посетили ИМР в да-

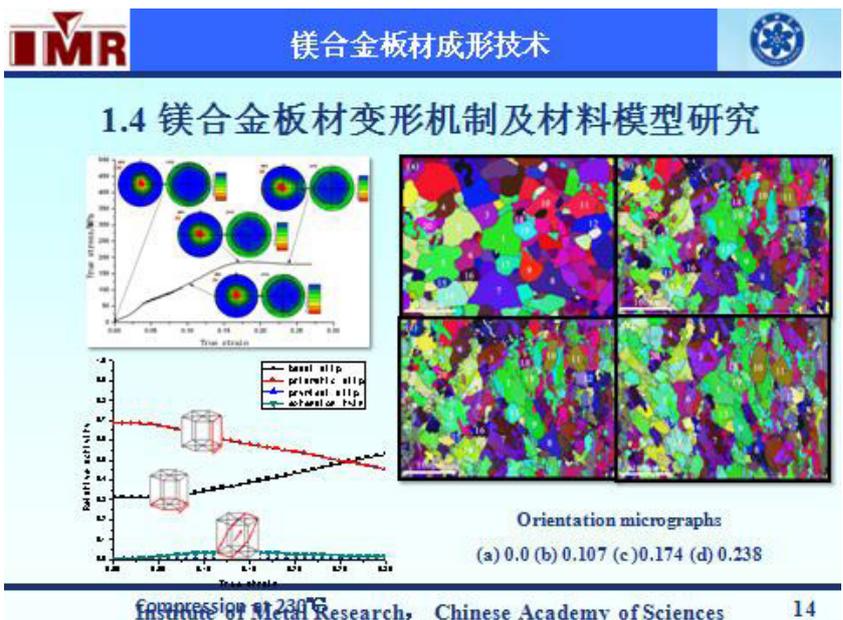
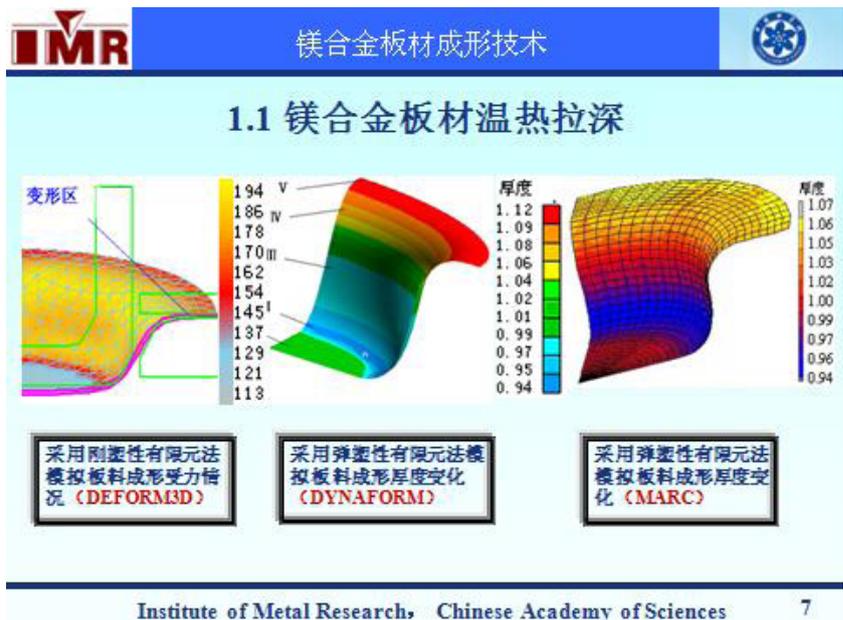


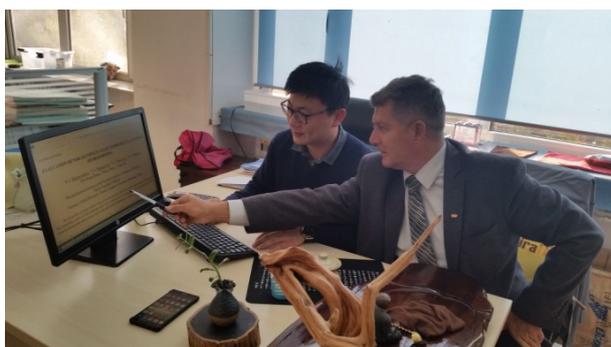
Рис. 9. Примеры моделирования напряжений и формируемой после обработки давлением микроструктуры (слайды из презентации ИМР)

леком 1977 году (академик Степаненко А.В. и д.т.н. Алифанов А.В.). После этого в ФТИ НАН Беларуси прошел стажировку Guan Dehui (ныне – проректор по международному сотрудничеству IMR). С течением времени были подписаны важные соглашения о взаимодействии, позволяющие ученым с обеих сторон встречаться, обмениваться опытом, читать лекции китайским аспирантам (рис. 10)

В настоящее время интерес IMR CAS к сотрудничеству с ФТИ НАН Беларуси обусловлен, вероятно, рядом причин. Во-первых, в ФТИ давно сложилась научная и технологическая школа по импульсной обработке листовых металлических материалов через промежуточные среды и прокатке труднодеформируемых материалов. Во-вторых, в импульсных технологиях ФТИ ис-



а



б



в



г



д

Рис. 10. Фрагменты переговоров, выступлений и чтения лекций:
 а) зав. лаб. Петренко В.В. рассказывает об основах поперечно-клиновой прокатки,
 б) к.т.н. Покровский А.И. и доктор Yong Xi обсуждают совместную научную статью,
 в) к.т.н. Жукова А.А. проводит переговоры по контракту,
 г, д) аспиранты IMR слушают лекцию по гидроформингу

пользуется очень высокая скорость деформации, которую мало кому удалось достичь; импульс большой энергии подается за очень короткое время (длительность воздействия - микросекунды).

В Китае, как и в большинстве других стран при гидроформинге используют области относительно низких скоростей деформации (длительность цикла обработки от 30 секунд и выше). По нашей терминологии это является очень медленным гидропрессованием. Во-вторых, в ФТИ имеется уникальное оборудование - действующие установки.

Большинство исследователей сходятся во мнении, что при импульсном варианте гидроформинга по сравнению с обычным, медленным, гораздо лучше заполняемость формы штампа, лучше обрабатываются трудно деформируемые материалы, а в случае обработки сплавов типа Инконель в условиях поперечно-клиновой прокатки удается значительно расширить интервал деформируемости.

Совместным исследованиям в области пластической обработки авиационных материалов и посвящено наше сотрудничество в настоящее время. Одна из проблем авиационной техники заключается в необходимости оперативного изготовления не-

больших (сотни штук), а иногда даже единичных (десятки штук) партий деталей. Оперативность в этой отрасли требуется на стадии создания экспериментальных и опытных образцов, когда нужно быстро сконструировать и опробовать новую модель самолета или вертолета и решать: дорабатывать ее, отклонять или запускать в серию. На этом этапе необходимость быстропереналаживаемой технологии штамповки крайне актуальна.

В предварительных переговорах китайской стороной были представлены для обсуждения более 40 эскизов и чертежей авиационных деталей, которые являются для них проблемными в изготовлении. Теоретически все детали подходят под технологию импульсной штамповки ФТИ, причем по тиражам они занимают именно «нишу» малотиражных деталей (например, годовая программа одной из деталей составляет всего 10 штук – вероятно, это экспериментальные образцы новых моделей техники). По сложности все обсуждаемые детали – сложные и очень сложные, которые в Китае не удастся получить обычным (медленным) гидроформингом. Детали имеют перемычки, пережимы, глубокие выемки, для заполнения которых металлу просто «не от куда браться» (рис. 11).

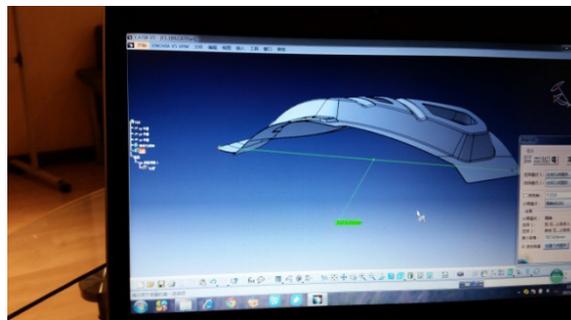
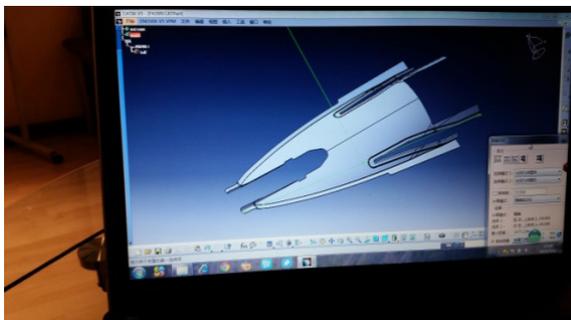


Рис. 11. Примеры изделий авиационной техники, получаемые штамповкой (фото предоставлено китайской стороной)

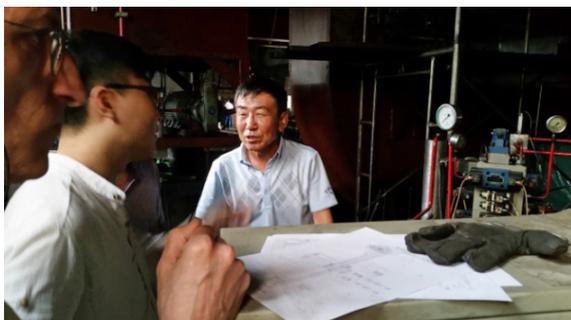


Рис. 12 Доктор Yong Хи вместе с директором завода гидравлических прессов (г.Шеньян) демонстрируют работу устройства пульсирующего гидроформинга

Нужно признать, что китайская сторона пытается существенно интенсифицировать процесс заполнения формы штампа при «медленном» гидроформинге за счет дополнительного использования циклического нагружения, для чего разработаны специальные устройства (рис. 12).

Для экспериментов и отработки технологии группа Shi-Hong Zhang используют оборудование фирмы «Shenyang star hydraulic press factory», где на сравнительно небольшой площади расположено большое число очень мощных гидравлических прессов. Нужно отметить, что для размещения нового оборудования IMR CAS также используется и недавно предоставленная институту т.н. «вторая площадка» на окраине Шеньяна. Там расположено несколько больших и пока еще пустых цехов, которые активно заполняются своим и покупным оборудованием.

Что касается успешности проведения процесса пластического формообразования авиационных изделий, то еще одной проблемой является то, что в авиации вообще, а в китайской, в частности, конструкторы закладывают в чертежи порой 10-ти кратный запас прочности и, соответственно, настаивают на изготовлении деталей из наиболее прочных марок алюминиевых сплавов (которые при обработке оказываются достаточно мало пластичными, «жесткими», нетехнологичными).

Общеизвестно, что алюминиевые сплавы на сегодняшний день являются одними из самых широко распространенных в аэрокосмической промышленности материалов, что объясняется совокупностью ряда физических, механических и эксплуатационных характеристик. Невысокая физическая плотность, достаточно высокие прочностные характеристики, высокая коррозионная стойкость, хорошая тепло- и электропроводность делают алюминиевые сплавы надежными конструкционными материалами в авиации. Одним из таких материалов является сплав 5A06. В странах СНГ более известен его аналог - АМг6. В этой связи интересно отметить, что в Китае алюминиевые сплавы имеют сложную маркировку, но при детальной расшифровке химического состава зачастую оказываются «клонами» советских разработок 30-х годов. Например, вся гамма высокопрочных алюминиевых сплавов аналогична советским ГОСТам.

В 2015 году между нашими институтами был подписан первый коммерческий контракт. Тематика контракта была обусловлена тем, что в условиях традиционного медленного гидро-

прессования в Китае алюминиевый лист класса «дюралюминий» показывает ограниченную пластичность, что проявлялось на готовых изделиях в виде трещин, надрывов, гофра.

Для подготовки к получению конкретных деталей предполагалось последовательно решить следующие задачи. ФТИ НАН Беларуси изготовил штамповую оснастку для получения некоторой небольшой модельной детали типа «колпачка» или «стаканчика», которая бы формой, радиусами, переходами повторяла бы проблемные места реальной детали. Китайская сторона предоставляла материал (алюминиевый лист). ФТИ на своем оборудовании провел опытную штамповку такого стаканчика при различных энергосиловых параметрах, специально недозаполняя форму штампа или наоборот, искусственно доводя образец до разрушения. Стороны неоднократно проводились обсуждения результатов экспериментов, прежде чем определили оптимальные энергосиловые параметры процесса гидроформинга (рис. 13).

После обработки результатов была построена своеобразная диаграмма пластичности, из анализа которой становились предельно ясными области технологических параметров, обеспечивающих бездефектную штамповку. Исходя из полученных результатов, была отработана технология гидроудара при получении из этого материала уже вполне реальной детали на имеющейся в ФТИ оснастке. Поскольку качество штамповок в ФТИ не вызвало никаких сомнений сейчас готовится совместное окончательное решение об изготовлении на базе ФТИ уже конкретной авиационной детали по китайским чертежам.

Создание совместной лаборатории.

Между тем, эффективность работы по прямым контрактам в том случае, когда партнеры - два академических института (причем оба из которых финансируются из бюджета), могла бы, наверное, быть выше. Ведь обе организации в большей мере занимаются наукой, а не коммерцией и не всегда могут позволить себе оплачивать сторонние контракты.

К тому же, как известно, в умении вести переговоры о величине договорной цене китайцам, пожалуй, нет равных в мире. Представители азиатской страны с тысячелетней историей, освоившей письменность на несколько веков раньше европейских стран, и имеющих фантастический природный дар к дипломатии, в большинстве случаев переигрывают европейских партнеров в финансовом торге.

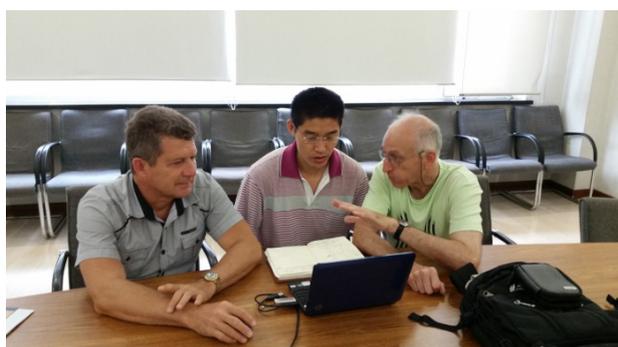


Рис. 13. Обсуждение хода выполнения белорусско-китайского контракта и результатов экспериментов по штампуемости при импульсном гидроформинге

Таким образом, обсуждения в среде технических специалистов, знающих сильные и слабые стороны друг друга, в процессе подписания контракта, могут затягиваться до бесконечности. Но как говорил Конфуций: «Тот, кто указывает на твои недостатки, не всегда твой враг; тот, кто говорит о твоих достоинствах, не всегда твой друг».

Так не лучше ли, объединить опыт друг друга и располагаться «по одну сторону баррикад». Это даст возможность реализовать совместные разработки третьим сторонам, выступать единым фронтом, ведя совместные исследования и, максимально используя сильные стороны друг друга.

Китайский руководитель проекта профессор Shi-Hong Zhang и директор ФТИ НАН Беларуси доктор В.Г. Залесский здраво рассудили, что не стоит сидеть друг напротив друга за столом переговоров: «Друга без изъяна не бывает; если

будешь искать изъян - останешься без друга» (Конфуций). Тем более это малопродуктивно в той области техники, в которой у каждого имеется множество наработок. И новой ступенькой в наших взаимоотношениях стало создание совместной лаборатории прогрессивных методов обработки металлов давлением.

Соответствующее соглашение было подписано летом 2017г в г. Минске. (рис. 14 + обложка).

25 октября 2017г. в г. Шэньян (провинция Ляонин, КНР) состоялось открытие совместной научно-исследовательской лаборатории ФТИ НАН Беларуси и Института исследования металлов КАН. Ее название - лаборатория передовых методов обработки металлов давлением ("Advanced Metal Forming Technologies"). Со стороны ФТИ НАН Беларуси присутствовали заведующий лабораторией предельной деформируе-

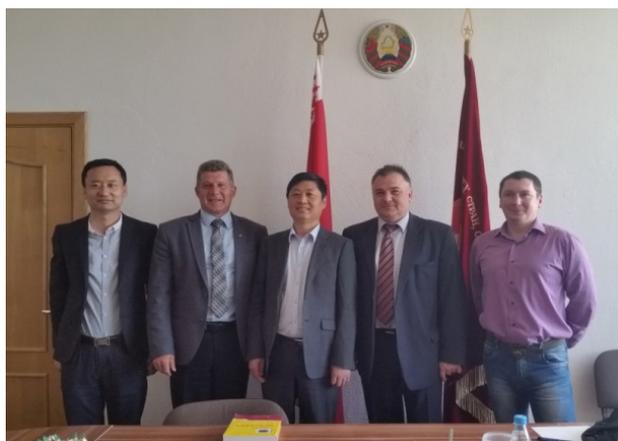


Рис. 14. Подписание соглашения об открытии совместной лаборатории



Рис. 15. Церемония открытия совместной лаборатории в г.Шеньяне 25.10.2017 г.

мости и поперечно-клиновой прокатки В.В. Петренко и заведующий лабораторией высоких давлений и специальных сплавов А.И. Покровский (рис. 15, фото обложка).

Со стороны Института исследования металлов КАН участие в открытии приняли директор института Rui Yang, начальник управления международного сотрудничества бюро по науке и технологиям г. Шеньяна Yu Hongyan, заведующий отделом деформационных технологий профессор Shi-Hong Zhang, а также весь большой коллектив сотрудников этого отдела (фото обложка).

Основные направления деятельности совместной лаборатории: исследование процессов высокоскоростного гидроударного деформирования листовых и трубчатых деталей и прокатки сложно деформируемых железоникелевых сплавов, используемых в авиационной промышленности.

Мы рассчитываем на широкий круг потребителей создаваемой научно-технической продукции, как в Китае (например, «Shenyang Aerospace Mitsubishi Motors Engine Manufacturing», «Shenyang Aircraft Corporation», так и в Беларуси (например, авиаремонтные заводы), в том числе и в Белорусско-китайском индустриальном парке «Великий камень» (рис. 17, фото обложка). Некоторых резидентов этого парка Shi-Hong Zhang и сотрудники IMR давно знают.

Немаловажно отметить, что совместная лаборатория предусматривает возможность использования высококласного исследовательского оборудования Shenyang National Laboratory for Materials Science (SYNL). Лаборатория - фактически еще один маленький институт, расположенный на площадях IMR и имеет статус «национальной». Это означает, что она в значительной мере финансируется из бюджета и оснащена са-



Рис. 17. Во время переговоров сотрудников IMR CAS и ФТИ НАН Беларуси с администрацией индустриального парка «Великий камень»

мым современным дорогостоящим оборудованием. Например, имеется десяток установок, стоимость которых превышает один миллион долларов. Нужно отметить, что все оборудование постоянно задействовано в исследованиях (*фото обложка*).

Важно, что деятельность совместной белорусско-китайской лаборатории предусматривает обмен аспирантами и техническими специалистами в рамках выполнения совместных работ, причем с финансированием за счет бюджета Китая. Соответствующие кандидатуры перспективных молодых ученых от ФТИ уже подготовлены.

Резюме

Идеи неравномерного всестороннего сжатия и гидропрессования, заложенные Т. Карманом и П. Бриджменом, развитые и дополненные С.И. Губкиным, В.П. Северденко, А.В. Степаненко, В.В. Клубовичем, их учениками и последователями, удалось успешно трансформировать в Физико-техническом институте НАН Беларуси в конкретные технологические процессы и высококлассное оборудование.

Основными преимуществами процесса гидропрессования по сравнению с обычным прес-

сованием являются: наиболее полное раскрытие потенциала пластичности пластических характеристик хрупких, малопластичных и трудно деформируемых материалов, расширение технологических особенностей процесса, улучшение структуры и свойств получаемых изделий. Очевидной «нишей» технологии импульсной гидроударной листовой штамповки является мелкосерийное производство, где эффект достигается за счет высокой равномерности прикладываемой нагрузки, низкой металлоемкости штамповой оснастки, быстрого освоения новых моделей.

Сотрудничество с Институтом исследования металлов Китайской академии наук и создание совместной лаборатории, очевидно, придаст новый импульс эффективного внедрения процессов пластической обработки металлов в реальном секторе экономики.

Совместная лаборатория ФТИ НАН Беларуси - IMR CAS сможет реализовать разработанные и проверенные на практике быстропереналаживаемые технологии листовой штамповки широкого круга изделий из алюминия, углеродистой, нержавеющей, жаропрочной стали, титана, латуни, меди, серебра, платины, ниобия толщинами от 0,5 до 3 мм.

Список использованной литературы

1. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach / Callister, William D., Rethwisch, David G. 2012 - Technology & Engineering - 910 pages.
2. Бриджмен П. В., Новейшие работы в области высоких давлений / Бриджмен П. В. // Успехи физических наук. – 1947. – Т.31, № 3. – С. 346–402.
3. Bridgman P.W. The physics of high pressure. Dover Publications, 1931 - 398 pages. Русский перевод книги: Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. – 444 с.
4. Губкин, С.И. Теория течения металлического вещества / С.И. Губкин, М.; Л.: ОНТИ, 1935.
5. Губкин С.И. Пластическая деформация материалов / С.И. Губкин, Т.1-3. – М.: Metallurgizdat, 1960-61.
6. Северденко, В.П. Теория обработки металлов давлением / В.П. Северденко. – Минск: Высшая школа, 1966, – 224 с.
7. Клубович, В.В., Степаненко А.В., Ультразвуковая обработка материалов. Мн.: Наука и техника, 1981. - 295 с.
8. Северденко, В.П. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента / В.П. Северденко, В.С. Мураш, Э.Ш. Суходрев. – Минск: Наука и техника. 1974, – 254 с
9. Покровский, А.И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы. Мн: Беларуская навука. – 2010. – 256 с.
10. Импульсные методы обработки металлов: Сб. ст. под ред. В.Н. Чачина. – Минск: Наука и техника, 1977. – 216с.
11. Библиографический указатель трудов, выполненных в ФТИ АН БССР по импульсным методам обработки материалов. – Минск: ФТИ АН БССР, 1978. – 31 с.
12. Гидроударная штамповка полукамер резонатора из сверхчистого ниобия. Состояние и перспективы создания резонаторов для нового поколения линейных ускорителей и коллайдеров: Труды международного рабочего совещания (Минск, 22–25 апреля 2014 г.) – [А.Ю. Журавский и др.]. Дубна: ОИЯИ, 2015 г. – 81 с. Стр. 42 – 48.
13. Устройство для ударной штамповки тонколистовых материалов на прессе: Пат. Респ. Беларусь 19098 от 30.04.2015 г. / А.Ю. Журавский, В.С. Петраковский, Г.Н. Здор, М.А. Батурицкий, А.И. Покровский, Н.Ю. Гутько.
14. Способ ударной штамповки деталей из листового материала эластичной средой: Пат. Респ. Беларусь 19099 от 30.04.2015 г. / А.Ю. Журавский, В.С. Петраковский, Г.Н. Здор, М.А. Батурицкий, А.И. Покровский, Н.Ю. Гутько.