

Технопарк высшей школы

Александр Евгеньевич Волхонский, профессор кафедры «Технология проектирования и эксплуатации летательных аппаратов» РГТУ-МАТИ им. К.Э. Циолковского, кандидат технических наук

Михаил Владимирович Ковалевич, доцент кафедры «Технология производства летательных аппаратов» РГТУ-МАТИ им. К.Э. Циолковского, кандидат технических наук

Алексей Викторович Гончаров, аспирант кафедры «Технология производства летательных аппаратов» РГТУ-МАТИ им. К.Э. Циолковского

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Самая совершенная машина и простейшая деталь всегда начинаются с того, что конструктор, осознав идею новой вещи, должен правильно выбрать обладающие нужными свойствами материалы. И хотя сегодня у машиностроителей богатейший выбор всевозможных материалов (растёт количество и область применения полимеров, керамики), но всё же главным конструкционным материалом остаются металлы и их сплавы. Благодаря своим необыкновенно разнообразным, порой уникальным свойствам, неисчерпаемым возможностям они незаменимы в большинстве отраслей современного производства.

Случается так, что предъявляемым требованиям не удовлетворяет ни один из них. И тогда создают новые, расширяющие возможности современной техники. Если в ка-

ком-либо металле или сравнительно простом сплаве не удаётся получить требуемый комплекс свойств, эти свойства как бы суммируют от разных металлов, набирая из них определённую композицию, например в виде своеобразного слоёного пирога с упрочняющей начинкой, — композиционные материалы.

Если конструктор получил нужный металл, приступил к воплощению своей идеи, представленной пока только в чертеже, то последний этап создания технической новинки зачастую настолько труден, что вынуждает изменять точно рассчитанные первоначальные формы придуманного изделия — скажем, приспособливаясь к возможностям существующих способов обработки. Формы конструкции могут быть настолько причудливы, что её и из пластилина-то не-

легко вылепить, не говоря уже о прочном и неподатливом металле. Словом, ни одно новшество не минует вопрос: как сформировать нужную деталь из нужного материала?

Практика показывает, что в этом деле желательны принципиально новые решения. Прогресс в авиационной и космической технике требует применения сверхпрочных, жаростойких и в то же время легких материалов. Чем легче летательный аппарат, тем больше полезного груза он может нести, тем меньше ему потребуется топлива. Земные машины также много выигрывают от «похудения». И дело здесь не только в экономии металла (хотя это и очень важная задача), но и в улучшении их эксплуатационных характеристик. Почти во всех случаях чем легче и компактнее машина, тем лучше и с меньшими затратами энергии она справляется со своей работой.

Проблема создания облегченных конструкций повышенной прочности и жесткости становится всё острее. Лучшие конструкторские идеи замирают на многие годы без её решения. Как же заставить высокопрочный, труднодеформируемый металл принять форму сложной детали?

Традиционный путь — это, образно говоря, действовать с позиции силы. Иными словами, создавать сверхмощное оборудование — прессы, молоты, прокатные станы, дорогостоящий инструмент, идти на большие затраты труда, энергии, материалов. Путь трудоёмкий, неэкономичный, а главное — не всегда дающий желаемого результата.

Быть может, есть какие-либо способы смягчить «характер» металла, сделать его на время обработки более податливым?

Один такой способ известен ещё с древних времён — это нагрев. Всем, конечно, из-

вестно: горячий, близкий к расплавлению металл пластичен, легко принимает заданную форму. Но, увы, одновременно он покрывается слоем окалины, а изготовленные из него детали при охлаждении изменяют свои размеры и форму. Получить готовое изделие с заданными параметрами, с хорошим качеством поверхности путём горячей обработки практически невозможно. К тому же велик расход энергии, необходимы довольно сложные нагревательные устройства.

И всё-таки металловеды не сбрасывали со счетов древний способ воздействия на металл, искали иные, более тонкие возможности его применения.

Английский учёный Пирсон первым обнаружил необыкновенное поведение сплавов олово-свинец и олово-висмут. Металл переставал быть похожим на самого себя при температуре всего лишь 150–300°C. Он становился настолько мягким, что скорее напоминал воск или размягченное стекло, из которого можно запросто вылепить, выдуть или вытянуть изделие любой формы. При ничтожном усилии образцы могли удлиниться в десятки раз — исследуемый образец достиг удлинения 1950% (рис. 1, б).

Исследованием этого явления позднее занимался советский академик А.А. Бочвар вместе с коллегой З.А. Свидерской. В 1945 г. в работе «О разных механизмах пластичности в металлических сплавах» они впервые ввели термин «сверхпластичность», который позже стал общепризнанным. Явление сверхпластичности было обнаружено на двухфазном сплаве цинк-алюминий — «цинкаль». Поэтому А.А. Бочвар понимал под «сверхпластичностью» явление, при котором двухфазный сплав

приобретал пластичность, превышающую пластичность каждой из его составляющих фаз.

Большой вклад в изучение сверхпластичности внёс французский учёный Треска, проводивший эксперименты по пластическому деформированию свинца и некоторых других твёрдых тел с середины 60-х до начала 70-х годов.

Явление, названное сверхпластичностью, изумило металлослов. И по сей день, несмотря на десятилетия исследований, оно далеко ещё не во всём понятно.

Сверхпластичность — свойство металлов и сплавов при определённых условиях получать большие степени деформации. Если в обычных условиях деформация в 10–15% считается хорошей, то в режиме сверхпластичности деформация может достигать сотен процентов (рис. 1, а).

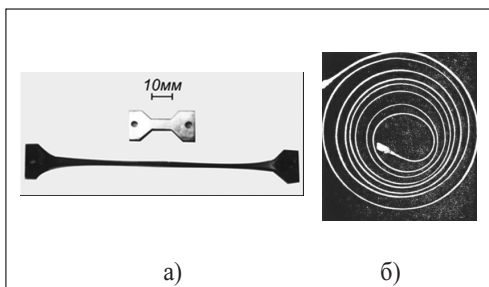


Рис. 1: а — плоский образец до и после сверхпластической деформации; б — образец Sn-Bi

Сверхпластичность наступает при температуре (0,4–0,8) T плавления и сильно зависит от размера зерна в материале. Для алюминиевых сплавов сверхпластичность наступает при температурах 380–550°, а для сплавов на основе титана с оптимальным размером зерна 10 мкм — при температурах 900–1200°С. Однако большое удлинение обычно достигается только

при малых скоростях деформации в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-3} с⁻¹. Также существует низкотемпературная сверхпластичность, которая достигается у некоторых сплавов с ультрамелкозернистой структурой при скоростях деформации больше 10^{-2} с⁻¹ (алюминиевый сплав 6061). Существует и высокотемпературная сверхпластичность для некоторых алюминиевых сплавов и композитов на их основе. При повышении или понижении температуры происходит увеличение размеров зерна, и заготовка выходит из режима сверхпластичности, что ведёт к её разрушению.

К условиям, при которых проявляется сверхпластичность, относятся:

1. Оптимальная постоянная температура деформации металла.
2. Постоянная малая скорость деформации.
3. Мелкозернистая структура металла.

Достаточно хорошо установлено, что сверхпластичность имеет две разновидности: фазовую и структурную. Поясним, о чём идёт речь, подробнее.

Известно, что металл имеет кристаллическую структуру. Нагрев до определённой температуры приводит к её изменению — фазовому превращению, когда металл находится как бы на грани твёрдого и жидкого состояния. Если в момент такого превращения его подвергнуть деформированию, то он под действием очень малого усилия будет течь как вязкая жидкость, и в этот своеобразный переломный момент и возникает состояние сверхпластичности. Поймать этот момент, а тем более использовать его для придания металлу задуманной формы крайне трудно даже в лабораторных условиях. Это всё равно, что балансировать на непредсказуемо

раскачиваемом канате. Поэтому фазовую сверхпластичность пока практически не используют.

Структурная сверхпластичность в этом отношении куда перспективней. Она связана с предварительной подготовкой металла. Вначале необходимо придать металлу особую структуру, состоящую из мельчайших кристаллов (зёрен) примерно одного размера — не более 10 мкм, причём равноосных, то есть близких к сферической форме. Поведение такого мелкозернистого металла под действием небольшого усилия напоминает то, что происходит с влажным песком в детских руках. Зёрна — это песчинки, а межзёрнёные границы — тонкие прослойки воды между ними.

Так и в металле. Если его структура состоит в основном из равноосных мелких зёрен, то пластичность возрастает, достигая максимального уровня при полностью мелкозернистой структуре. В вязкой среде межзёрненного материала сами зёрна без особых затруднений как бы скользят друг относительно друга, не зацепляясь и не создавая заторов в узких местах формы. Основным механизмом сверхпластичности является зернограничное скольжение — перемещение зёрен (A, B, C, D) друг относительно друга происходит подобно движению частиц в сыпучих материалах (рис. 2).

Металл в определённом диапазоне температур, почти не сопротивляясь, течёт и легко принимает любую форму. Для различных сплавов температуры для сверхпластичного деформирования, разумеется, неодинаковы.

Все технологические процессы, связанные с использованием сверхпластичности, основаны на обработке сплавов с предварительно подготовленным ультрамелким зерном. Такие

сплавы получают или специально, заранее задавая нужные свойства, или из известных промышленных сплавов, подвергая их термомеханической обработке. Учёные уже создали несколько десятков новых сверхпластичных сплавов. Ещё шире гамма «старых» сплавов на основе железа, титана, никеля, магния, алюминия, меди и других металлов, для которых найдены способы искусственного измельчения зерна.

Успехи в фундаментальных и прикладных исследованиях, направленных на создание основ использования сверхпластичности при обработке металлов давлением, привели к формированию научных центров по данной тематике. Первая проблемная лаборатория в нашей стране была организована в 1982 году в МИСиСе. Работы и исследования по внедрению процессов обработки с применением эффекта сверхпластичности проводятся в НИАТе, МАТИ им. К.Э. Циолковского, Национальном исследовательском Иркутском государственном техническом университете. В Уфе в 1985 году организован и проводит работы в области физики прочности и пластичности, конструкционных материалов и технологий формообразования материалов Институт проблем сверхпластичности РАН.

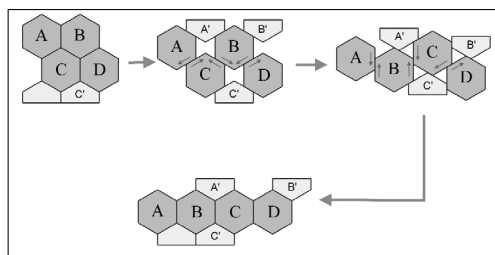


Рис. 2. Схема механизма зернограничного скольжения

Виртуозно и безотходно

При крупносерийном производстве в промышленности часто применяют так называемую объёмную штамповку. Под действием прессы заготовка заполняет полость, вырезанную в штамп-инструменте, и формируется готовое изделие. Этот процесс хорошо поддаётся автоматизации. Всем он хорош, если бы не весьма существенный недостаток: увы, точность формообразования весьма невысока. Даже выверенная технология не исключает большого количества отходов. При механической доводке изделия в стружку уходит до 20% металла.

С середины 60-х годов начинается практическое применение эффекта сверхпластичности. Были разработаны технологические процессы как объёмной, так и листовой штамповки.

Объёмная штамповка — процесс изменения формы и размеров простейших объёмных заготовок (цилиндрической, призматической и других форм) в более сложные изделия с помощью специализированного инструмента штампа, который состоит из матрицы, пуансона и дополнительных частей. При объёмной штамповке в качестве заготовки используют сортовой металл, разрезаемый на заготовки. На заготовку в процессе объёмной штамповки воздействуют специализированным инструментом — пуансоном, при этом металл заполняет полость матрицы, приобретая её форму и размеры.

Различают холодную (без нагрева) и горячую объёмную штамповку. Горячая штамповка осуществляется с нагревом до температуры 200–1300 °С в зависимости от состава сплава и условий обработки. Процесс горячей объёмной штамповки аналогичен по физической сущности

свободной ковке, но осуществляется в штампах. Горячей объёмной штамповкой получают поковки, однородные по структуре, сравнительно высокой точности, сложной конфигурации, которой невозможно добиться при свободной ковке. Однако средний коэффициент использования металла равен 0,5–0,6 (т.е. до 50–40% металла идёт в отход), при холодной штамповке этот коэффициент значительно выше.

При объёмной штамповке деталей в состоянии сверхпластичности из-за достижения больших степеней деформации получают высокоточное заполнение штампов сложной конфигурации. Общее снижение стоимости изготовления объёмных штамповок составляет более 25% по сравнению с обработкой в несверхпластичном состоянии. Технология обработки материала в состоянии сверхпластичности нашла применение при изготовлении штампованных силовых узлов, сложных силовых оболочек и колёс транспортных средств (рис. 3), арматуры и облицовки автомобилей, поршней двигателей внутреннего сгорания, турбинных дисков и лопаток. Объёмной штамповкой получают детали практически всех машин и механизмов массой до нескольких сотен тонн, такие как диски колёс, шатуны и коленчатые валы двигателей и др.

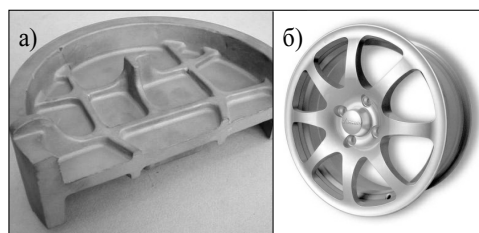


Рис.3. Детали, полученные объёмной штамповкой: а) — титановый корпус; б) — автомобильный диск

Штамповка воздухом

В листовой штамповке широкое распространение получил процесс пневмотермической формовки (ПТФ) — формовка заготовки в режиме сверхпластичности за счёт утонения свободной части заготовки (см. рис. 4).

Процесс включает в себя следующие стадии:

1. Нагрев заготовки до рабочей температуры.
2. Прижим заготовки с целью создания герметичной полости в матрице.
3. Формовка заготовки избыточным давлением газа. Необходимым условием является поддержание постоянства скорости деформации.
4. Размыкание штампа, извлечение отформованной детали из матрицы.

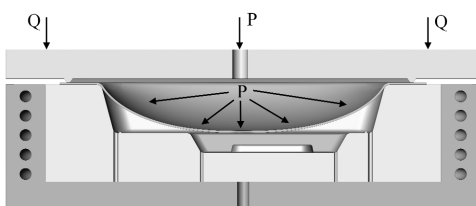


Рис. 4. Схема процесса пневмотермической формовки



Рис. 5. Промышленный пресс для ПТФ французской фирмы ACB

Если на начальных этапах внедрения процесса использовалось оборудование на базе обычных гидравлических прессов, то сейчас создано специальное оборудование для ПТФ (рис. 5). В состав комплекса входят:

1. Верхняя и нижняя станины, соединённые колоннами (либо сварная рама).
2. Прижим, приводимый в движение гидравлическими цилиндрами.
3. Система нагрева и тепловые экраны.
4. Система подачи газа и регулирования давления.
5. Система контроля и регистрирования параметров процесса.

Штамп для ПТФ показан на рис. 6. Через центральное отверстие в прижиме подаётся газ под давлением P . Обычно для алюминиевых сплавов рабочим газом является воздух. Для некоторых сплавов из-за негативных химических реакций с воздухом рабочим газом является аргон (титановые сплавы) или другие инертные газы.

Процесс пневмотермической формовки имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными операциями листовой штамповки:

- 1) уменьшение времени и трудоёмкости производства деталей за счёт отсутствия доводочных операций (правка, калибровка), что приводит к уменьшению себестоимости детали;
- 2) получение деталей сложной геометрической формы за один штамповый переход;
- 3) увеличение качества поверхности детали;
- 4) уменьшение усилий прессового оборудования.

Процесс формовки, в том числе и пневмотермической, происходит только за счёт растяжения свободного материала, в отличие от вытяжки, где материал втягивается в зону деформации

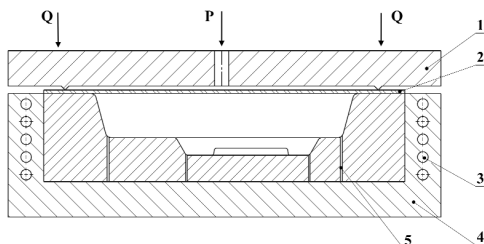


Рис. 6. Штмп для ПТФ: 1 — прижим, 2 — заготовка, 3 — нагреватель, 4 — матрица, 5 — дренажное отверстие

с краев заготовки. В результате этого процесс формовки сопровождается значительным и неравномерным уменьшением исходной толщины заготовки (утонением материала). Данное явление называют разнотолщинностью. Разнотолщинность является основным недостатком процесса. На рис. 7. показана модель распределения толщины в детали, полученной ПТФ.

Как видно на рис. 6, утончение отформованной детали составило 42% от начальной толщины. Для борьбы с разнотолщинностью применяют различные методы: нанесение специальных смазок на матрицу, что изменяет силы трения о заготовку; установку в матрицу вставок из материалов с большей или меньшей теплопроводностью, чем у матрицы; управление распределением толщины за счёт предварительной

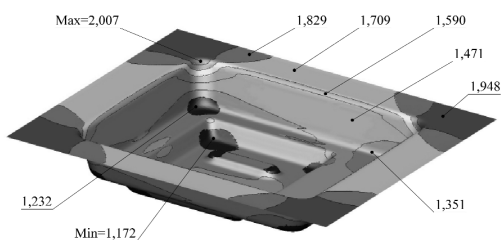


Рис. 7. Распределение толщины материала (градация по шкале толщины: красный — 2 мм, синий — 1,17 мм)

подготовки исходной заготовки; совмещение ПТФ с операциями гибки и вытяжки. Вышеперечисленные методы позволяют снизить разнотолщинность на десятки процентов.

При расчёте технологических параметров основной задачей является расчёт зависимости давления формовки от времени. Это связано с необходимостью поддержания постоянной скорости деформации материала в очаге деформации.

Так как материал при сверхпластическом течении практически не упрочняется, то расчёт параметров процесса можно вести по упрощённой формуле:

$$\sigma = K \varepsilon^m,$$

где K — коэффициент, зависящий от свойств материала;

σ — напряжение;

ε — скорость деформации;

m — модуль скоростного упрочнения.

Величины ε , m и K берутся из справочников. Справочные данные получают из экспериментов на одноосное растяжение образца в режиме сверхпластичности. Как уже говорилось, для высокой эффективности процесса, кроме поддержания постоянной температуры, необходимо поддерживать постоянство скорости деформации ($\varepsilon = \text{const}$). Это достигается регулированием давления рабочего газа по ходу процесса. Современные комплексы могут регулировать давление газа по заранее введённой графике. График зависимости давления формовки от времени называется кривой нагружения. Расчёт давления формовки является сложной инженерной задачей, поэтому часто применяют программные продукты, основанные на методе конечных элементов, такие как Deform, PAM Stamp 2g, Marc, Abaqus и др. Данные программы позволяют оценить рас-

пределение толщины и напряжений по заготовке, построить приблизительные кривые нагружения.

В общем случае кривую нагружения (рис. 8) можно условно разбить на 3 зоны.

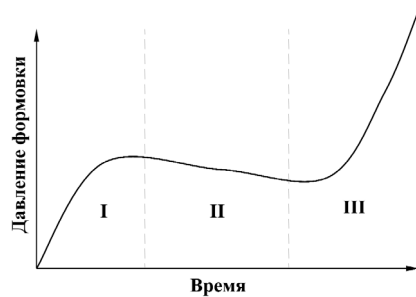


Рис. 8. Типовая кривая нагружения

В зоне I происходит свободная выдувка (рис. 9, а), в зоне II происходит оформление дна или боковой стенки (рис. 9, б), в зоне III происходит формовка-калибровка углов (рис. 9, в).

В настоящее время ПТФ для алюминиевых и титановых сплавов успешно внедрена на множестве предприятий авиационной и автомобильной промышленности.

Многие автомобильные фирмы, такие как Ford, Honda, Morgan, Maybach и другие, перешли на изготовление деталей сложной формы (капоты, крылья, детали интерьера, дверные панели, баки) с помощью пневмоформовки, что позволило снизить вес конструкции и удешевить производство.

Однако в автомобильную промышленность технология пришла из аэрокосмической отрасли. В самолётостроении большой интерес представляет формовка деталей из титановых сплавов. Применение титановых сплавов обусловлено тем, что они имеют большую прочность и меньший вес по сравнению со стальными, обладают высо-

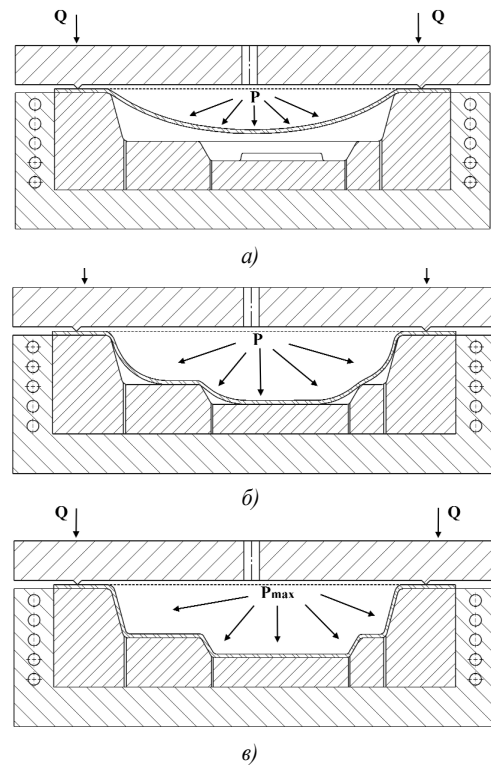


Рис. 9 а). Этапы пневмотермической формовки детали

Рис. 9 б, в). Этапы пневмотермической формовки детали

кой коррозионной стойкостью и жаропрочностью. Детали, выполненные из титановых сплавов, имеют большой ресурс. Однако титановые сплавы труднодеформируемы, поэтому технология ПТФ позволяет удешевить производство деталей. С помощью ПТФ из титановых сплавов получают тепловые экраны, для защиты элементов конструкции от струй двигательных газов (см. рис. 10), различные лючки, топливные баки, панели, элементы гондол двигателей (носки воздухозаборников).

В настоящее время получило широкое распространение совмещение технологии ПТФ и диффузионной сварки (ДС). Сварка осуществляется за счёт диффузии — взаимного проникновения атомов свариваемых изделий при повышенной температуре около $(0,5—0,7) T$ плавления. С помощью совмещения данных технологий получают многослойные панели (сэндвичевые конструкции), применяемые в авиастроении (см. рис. 11).

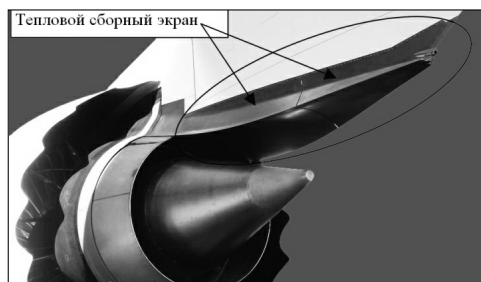


Рис. 10. Детали из титановых сплавов

Научная работа в области ПТФ ведётся и на кафедре «Технология производства летательных аппаратов» университета МАТИ им. К.Э. Циолковского. В лаборатории были получены опытные образцы (см. рис. 12 а, б) из магниевого сплава для деталей ячеистой конструкции и различных коробчатых деталей.

Как мы показали, специалисты создали целый ряд технологических процессов получения различных изделий из металлов в состоянии сверхпластичности, которые являются совершенно уникальными и позволяют получать просто «фантастические» детали и конструкции.

Сегодня, конечно же, невозможно предвидеть все разнообразнейшие области и ус-

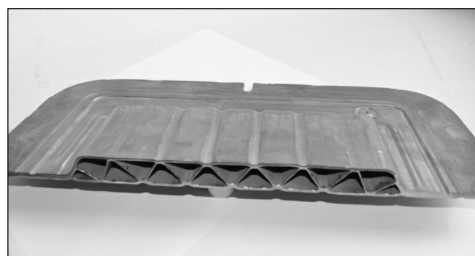


Рис. 11. Трёхслойная панель из титанового сплава

ройства, где сверхпластичность принесёт успех. Но и тех немногих примеров, которые мы привели, достаточно, чтобы понять, насколько плодотворным может быть научное открытие и как много уникальных возможностей оно сулит для практики.

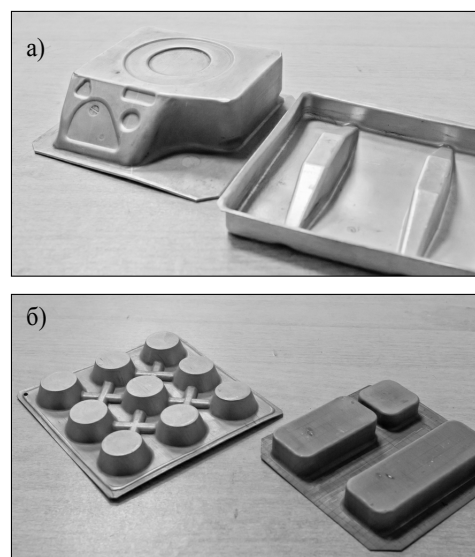


Рис. 12. Детали, полученные в лаборатории кафедры «ТПЛА» МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского