

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ТЕРМОУПРУГИХ ПРЕССОВ: РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИНЕРЦИОННОСТИ СИСТЕМЫ

М.В. Жаров (МАИ)

Рассматриваются методы точного соблюдения температурно-скоростных параметров деформирования металлов и сплавов при использовании автоматизированной системы управления работой термоупругих прессов. Выявлена основная проблема, препятствующая активному промышленному применению автоматизированных систем управления работой оборудования рассматриваемого типа, а именно, инерционность системы. Определены перспективность и эффективность применения метода экстрополяционных механизмов прогнозирования температурно-скоростных параметров термоупругих прессов для решения проблемы инерционности термокомпрессионных установок.

Ключевые слова: термоупругие прессы, термокомпрессионные установки, сверхпластичность материала, изотермическая штамповка, коэффициент использования металла, дефекты формы, процесс складкообразования, управляющий сигнал, коэффициент термического расширения.

Введение

На современном этапе развития в машиностроении вообще и в авиастроении, в частности, предъявляются требования по разработке безотходных и малоотходных технологий изготовления деталей и полуфабрикатов из металлических материалов. Это обусловлено в первую очередь высокой стоимостью металлических материалов и высокой долей расходов на основные материалы в себестоимости готовой продукции. При изготовлении деталей планера самолета (детали оперения, силовые элементы, орбренненные панели, элементы механизации крыла и т.д.) стоимость материалов может составлять до 80...90% в себестоимости деталей и полуфабрикатов. Одним из методов снижения отходов при горячей объемной штамповке деталей ответственного назначения и повышения коэффициента использования металла является использование технологий изотермической штамповки и штамповки в состоянии сверхпластичности. Данные технологии позволяют максимально использовать пластические свойства металлических материалов, минимизировать допуски на последующую механическую обработку и в итоге снизить норму расходов основных материалов на производство единицы продукции. Это особенно актуально при производстве изделий из дорогостоящих авиационных материалов. Кроме того, применение методов изотермической штамповки и штамповки в состоянии сверхпластичности обеспечивает возможность деформационной обработки труднодеформируемых сплавов, получение изделий и полуфабрикатов из которых другими деформационными методами невозможна или затруднительна. Сверхпластичность материалов (в том числе алюминиевых сплавов, склонных к деформированию в состоянии сверхпластичности) обеспечивается медленной скоростью деформирования (порядка $0,001...0,01 \cdot 10^{-3}$ м/с) и высокой температурой обработки. При этом создаются условия для обеспечения структурной рекристаллизации зерен, что в результате способствует возвращению пластических свойств деформируемого материала. Таким образом, степени деформации могут достигать 250...300% без признаков разрушения материала или исчерпание ресурса пластичности [1, 2].

В области малоотходной и безотходной штамповки авиационных деталей и полуфабрикатов с применением методов изотермической штамповки и штамповки в состоянии сверхпластичности активно начинают применяться технологии с использованием деформационной обработки на термоупругих прессах.

Термоупругие прессы как один из видов термокомпрессионного оборудования обеспечивают силовое воздействие на заготовку за счет нагрева и последующего термического расширения силовых элементов оборудования. Одним из преимуществ термоупругих прессов (термокомпрессионного оборудования) является не только создание изотермических условий обработки, но и возможность минимизации скорости движения деформационного инструмента. Минимальная скорость движения инструмента позволяет деформировать заготовки без потери устойчивости и, кроме того, позволяет уравновесить протекающие во времени процессы упрочнения и рекристаллизации в металле и проводить обработку в уникальном состоянии сверхпластичности, когда материал заготовки может деформироваться без разрушения бесконечно долго. В результате указанные технологии обработки позволяют использовать минимальные припуски на последующую механическую обработку, а для ряда изделий вообще позволяют исключить необходимость в последующей механической обработке [3]. Все это в итоге способствует увеличению коэффициента использования металла.

Постановка проблемы

Из практики известно, что наиболее существенными недостатками процессов обработки металлов и сплавов на термоупругих прессах являются:

- незначительная величина рабочего хода, определяемая геометрическими параметрами конструкции установки;
- сложность управления величиной и скоростью рабочего хода.

В термокомпрессионных установках, которые являются разновидностью термоупругих прессов, проблема увеличения хода устройства решается за счет

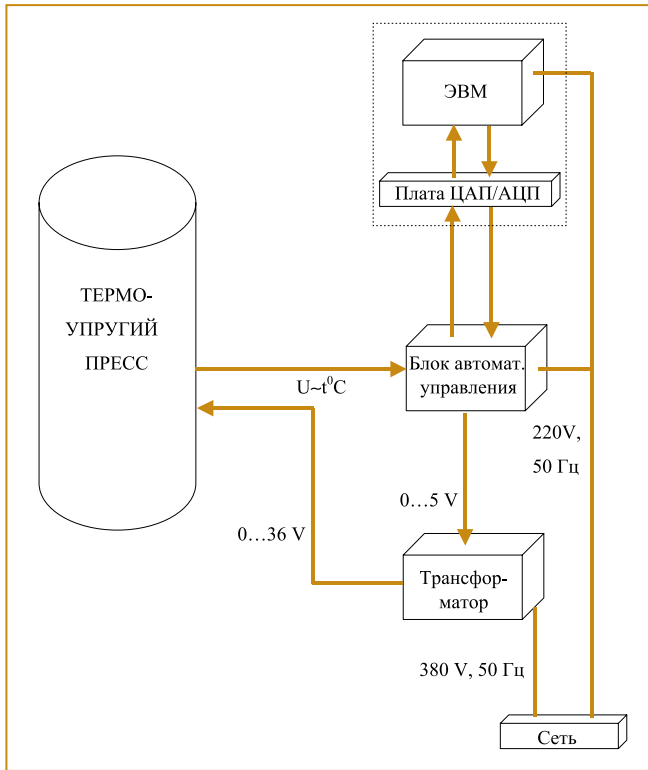


Рис. 1. Схема АСУ режимами работы термокомпрессионной установки

применения в рабочих блоках нескольких подвижных силовых контуров со смещающимися друг относительно друга опорными и рабочими клиньями.

Известно, что величина хода любого термокомпрессионного устройства определяется рядом технологических параметров: температурой нагрева опорных и подвижных элементов термоупругого пресса, коэффициентом линейного термического расширения материала рабочих элементов установки, линейными размерами этих элементов. Следовательно, скорость нагрева рабочих элементов термокомпрессионного устройства определяет скорость движения рабочих деталей штампа и, как следствие, скорость деформирования заготовки [4].

Для решения проблемы точного соблюдения температурно-скоростных режимов деформирования на термокомпрессионной установке необходима автоматизированная система управления, так как ручное управление системой приводит к значительным отклонениям от заданных температурно-скоростных параметров деформирования. В связи с этим разработана автоматизированная система для управления процессами штамповки на термоупругих прессах (рис. 1), включающая:

- термоупругий пресс (термокомпрессионную установку) со штамповой оснасткой и с подключенным к нему термоизмерительным устройством (термопарой);
- трансформатор;
- блок автоматизированного управления скоростью нагрева термокомпрессионной установки;

- персональный компьютер с вмонтированной в его корпус платой цифро-аналогового преобразователя [5, 6].

Основным элементом системы является непосредственно сама термокомпрессионная установка, состоящая из станины, рабочих блоков, термических электронагревателей (ТЭНов) и элементов теплоизоляции корпуса установки. Подаваемый на ТЭНы ток от трансформатора напряжением ≤ 36 В нагревает ТЭНы и клиновидные сегменты термокомпрессионной установки, изготовленные из материала с высоким коэффициентом термического расширения – стали 70ГНДХ ($\alpha = 32 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$). Нагреваясь и расширяясь, рабочие клиновидные сегменты перемещаются по опорным клиновидным сегментам, создавая давление на установленную в центральную часть штамповую оснастку с заготовкой.

Термопарой, установленной в нагреваемые рабочие элементы термокомпрессионной установки, вырабатывается напряжение, пропорциональное температуре нагрева установки (рис. 1). Это напряжение поступает в блок автоматизированного управления, который преобразует полученный сигнал и подает его на плату цифро-аналогового преобразователя в корпусе ЭВМ. Плата ЦАП-АЦП модифицирует аналоговый сигнал напряжения в цифровой код для передачи его в ЭВМ. Специально созданная программа анализирует данные о температуре нагрева термокомпрессионной установки, сравнивает их с заданными показателями и вырабатывает управляющие рекомендации в виде сигнала для блока автоматизированного управления. Принципиально важной особенностью системы автоматизированного управления является то, что с помощью разработанной программы задается не просто требуемая температура нагрева ТЭНов, а динамика нагрева последних в зависимости от времени работы установки, что позволяет управлять скоростью перемещения инструмента и, следовательно, скоростью деформации.

Блок управления предназначен для измерения и поддержания в необходимых пределах температуры ТЭНов. Питание блока осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В. Блок автоматизированного управления может работать под управлением персонального компьютера или в ручном режиме. Блок обеспечивает:

- высокоточное усиление сигнала от двух термопар, подключенных к входным гнездам блока и выдачу напряжения, пропорционального термоЭДС для аналого-цифрового преобразователя;
- отображение на индикаторе реальной температуры нагрева клиновидных сегментов термокомпрессионной установки;
- отсчет времени работы установки на электронных часах;
- регулирование тока от трансформатора на ТЭНы в пределах 5...95 % от номинального значения.

Блок автоматизированного управления, подавая управляющий сигнал напряжением 0...5 В на трансформатор, управляет скоростью нагрева термических электронагревателей (ТЭНов), обеспечивая выдачу трансформатором напряжения в диапазоне 0...36 В пропорционально управляющему сигналу от ЭВМ и в зависимости от расхождения фактической и заданной температуры рабочих элементов термокомпрессионной установки. Назначение трансформатора в системе довольно тривиально: последний служит для преобразования переменного тока промышленной частоты (50 Гц) и напряжением 380 В в постоянный ток напряжением ≤ 36 В. Данный ток и определяет интенсивность нагрева ТЭНов термокомпрессионной установки, а скорость нагрева термических электронагревателей определяет интенсивность термического расширения клиновых элементов установки и соответственно скорость деформирования.

Для управления автоматизированной системой в МАИ была создана прикладная программа управления TermoControl 3.1 Alpha. Назначение данной программы - в автоматическом режиме отслеживать текущую температуру нагрева ТЭНов, сравнивать ее с заданной и в итоге вырабатывать управляющие команды на отключение/включение нагрева установки, перехода к более интенсивному или менее интенсивному режиму нагрева. Блок-схема прикладной программы управления TermoControl 3.1 Alpha представлена на рис. 2. Программа TermoControl 3.1 Alpha была разработана для реализации процессов изотермической штамповки и штамповки в состоянии сверхпластичности панелей и обечаек из алюминиевых сплавов АМг6, 01420, Д16, В95 на предприятиях холдинга АО "Корпорация "Московский институт теплотехники" (МИТ), которое является крупным производителем продукции обороной промышленности и изделий двойного назначения.

Алгоритм работы программы. На первоначальном тапе пользователь вводит время нагрева $\tau_{\text{треб.}}$ и требуемую температуру, соответствующую этому времени $T_{\text{треб.}}$. Ввод может осуществляться в режиме заполнения специальной формы, имеющий вид таблицы, или алгоритм нагрева выбирается из списка типовых алгоритмов нагрева, выдержки, охлаждения. Заполнение формы зависимости требуемой температуры $T_{\text{треб.}}$ от времени $\tau_{\text{треб.}}$ во втором случае производится программой автоматически. Включается внутренние часы программы (текущее время работы $\tau = 1$ с) и программа запускает автоматизированную систему управления термоупругим прессом на нагрев с максимально интенсивностью; подаваемое на ТЭНов от трансформатора напряжение максимально ($U = \max$) (рис. 2).

В каждый момент времени $\tau_{\text{факт.}}$ с помощью термопар, встроенных в термоупругий пресс, происходит определение фактической температуры $T_{\text{факт.}}$ нагрева рабочих и опорных клиньев. Далее происходит сравнение фактических температур нагрева рабочих и опорных клиньев с исходно заданной температурой $T_{\text{треб.}}$. Анализ производится на конкретный момент времени, и после сравнения формируется управляющий сигнал для автоматизированной системы. Если заданный режим нагрева полностью соблюдается

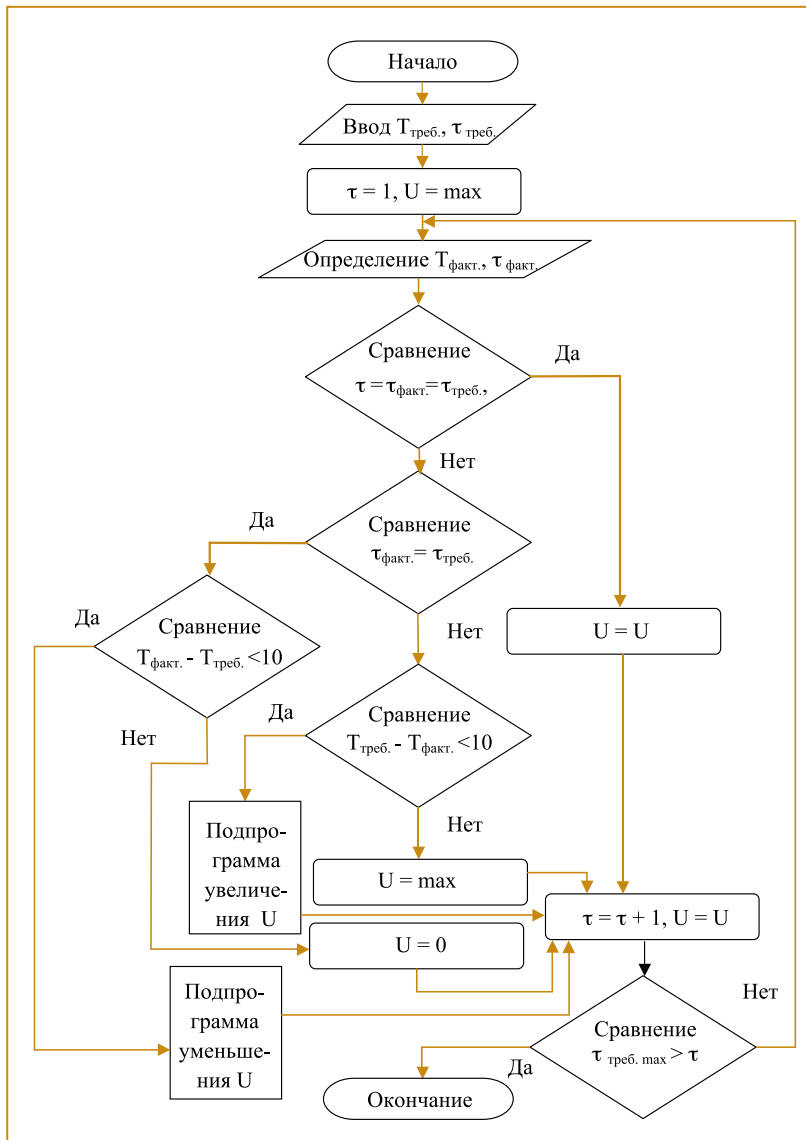


Рис. 2. Блок-схема прикладной программы управления автоматизированной системой TermoControl 3.1 Alpha

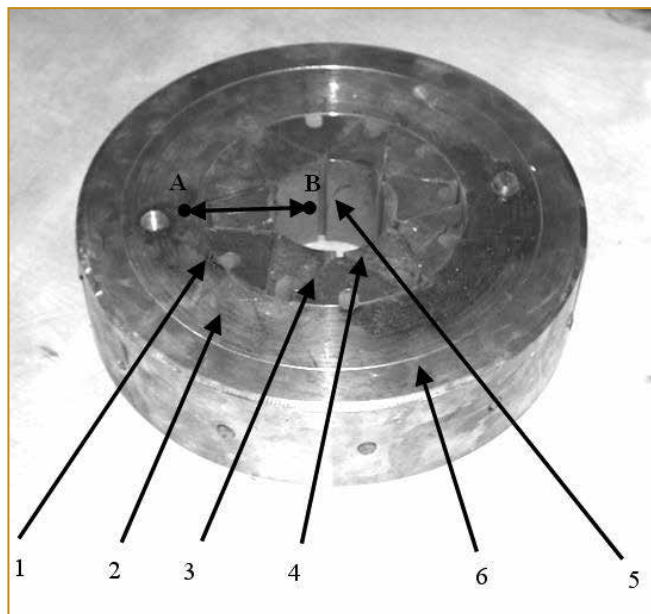


Рис. 3. Рабочий блок термокомпрессионной установки: 1 – отверстия под термические электронагреватели (места для установки ТЭНов); 2 – внутреннее кольцо рабочего блока; 3 – промежуточный клиновидный сегмент из сплава 70ГНДХ; 4 – подвижный (рабочий) клиновидный сегмент из сплава 70ГНДХ; 5 – центральная часть рабочего блока (место для установки термоизмерительных устройств (термопары)); 6 – внешнее опорное кольцо рабочего блока

($\tau = \tau_{\text{факт.}} = \tau_{\text{треб.}}$, $T_{\text{факт.}} = T_{\text{треб.}}$), то сохраняется прежнее значение подаваемого на ТЭНы напряжения ($U = U$). В противном случае требуется дополнительный анализ текущей ситуации. Если фактическая температура больше требуемой ($\tau_{\text{факт.}} = \tau_{\text{треб.}}$; $T_{\text{факт.}} > T_{\text{треб.}}$), производится дополнительный анализ с целью определения, насколько велико расхождение значений температур. Если различие больше чем 10°C , то программа отключает подаваемое напряжение ($U=0$). Если различие менее 10°C , то подгружается подпрограмма для выработки сигнала, уменьшающего подаваемое на ТЭНы напряжение для уменьшения интенсивности нагрева и, следовательно, для снижения скорости деформирования. В случае отставания реальных значений температуры нагрева от требуемых действия программы прямо противоположны – либо включается максимальная интенсивность нагрева ($U=\text{max}$) при отставании фактической температуры $T_{\text{факт.}}$ от заданной $T_{\text{треб.}}$ более чем на 10°C , или подключается подпрограмма для уменьшения интенсивности нагрева при отставании фактической температуры $T_{\text{факт.}}$ от заданной $T_{\text{треб.}}$ менее чем на 10°C . Далее происходит добавление нового текущего интервала времени ($\tau = \tau + 1$) при сохранении созданного напряжения на ТЭНах ($U = U$), а также сравнение с предельной длительностью всего заданного режима нагрева, выдержки и охлаждения ($\tau_{\text{треб. max}} > \tau$). Если максимальное время штамповки

на термоупругом прессе еще не выработано, то цикл проверки и управления повторяется (рис. 2).

Недостатки автоматизированной системы управления термоупругими прессами

Однако при промышленном использовании данной прикладной программы был выявлен ряд серьезных недостатков. Первой проблемой является инерционность всей системы. Выявлено, что в процессе нагрева фактическая температура постоянно колеблется вокруг заданной, иногда превышая ее, иногда показывая меньшие значения. Это критически сказывается на скорости деформирования, что может приводить, в частности, к потере устойчивости фрагментов полуфабриката, возникновению дефектов в металле в виде утяжин, складок, трещин. Второй недостаток прикладной программы – это ее недружественный диалоговый режим с пользователем. В первоначальных версиях программы пользователь должен был вводить в табличной форме требуемую температуру в каждый конкретный момент времени. Существует множество режимов нагрева, выдержки охлаждения термокомпрессионной установки при штамповке разных изделий, обработке различных материалов. Следовательно, процесс ввода информации и предварительно необходимый расчет оптимальных режимов нагрева значительно увеличивает трудоемкость задания исходных параметров.

Совершенствование автоматизированной системы управления термоупругими прессами

На рис. 3 представлен рабочий блок термокомпрессионной установки. ТЭНы, установленные в отверстия 1, нагревают внутреннее кольцо рабочего блока 2, промежуточные (опорные) клиновидные сегменты из сплава 70ГНДХ 3 и подвижные (рабочие) клиновидные сегменты из того же сплава 4. За счет термического расширения всех этих элементов происходит не только линейное удлинение рабочих клиньев в направлении центра рабочего блока, но и смещение клиновидных элементов друг относительно друга. В результате сжимается штамповая оснастка установленная в центральной части рабочего блока 5 и происходит деформирование заготовки в состоянии сверхпластичности или в условиях изотермической штамповки. Как видно на рис. 3, имеется довольно большое расстояние от места для установки термопары (места измерения температуры (позиция 5)) до мест для размещения ТЭНов (позиция 1), равная величине отрезка $|AB|$. Таким образом, когда ТЭНы уже разогреты до требуемой температуры, в зоне контроля наблюдается меньшая температура, чем требуется. Распространение тепла в данном конкретном случае идет исключительно за счет явления теплопроводности, и поэтому требуется определенное время на передачу тепла от точки поступления тепла до точки контроля температуры.

С другой стороны, если температура в точке контроля будет равна заданной, то от автоматизированной системы управления поступит сигнал на отключение нагрева, но тепло от уже разогретых ТЭНов и соседних к ним областей за счет теплопроводности и градиента температур по-прежнему будет поступать в зону штамповой оснастки и в результате пре-высит заданные оптимальные значения. Данное явление можно охарактеризовать как инерционность автоматизированной системы управления. Отклонения от заданных режимов деформирования приводят к потере устойчивости заготовок и образованию неисправимых дефектов формы изделий [7, 8]. Решить данную проблему конструктивными методами размещения термопар рядом с ТЭНами невозможно по двум причинам:

- разместить термопару рядом с ТЭНами или клиновидными сегментами физически невозможно – элементы термопары будут продеформированы в процессе перемещения клиньев;
- требуется контролировать температуру и в центральной части рабочего блока, где установлена штамповая оснастка и находится обрабатываемый материал, а не только в области с клиновыми сегментами рабочего блока.

Для решения проблемы инерционности системы первоначально было предложено применение широтно-модульной модуляции (ШИМ) для управления выдчей тока на ТЭНЫ с целью уменьшения интенсивности нагрева при достижении значений близких к предельным значениям требуемой температуры. Известно, что метод широтно-модульной модуляции в настоящее время активно применяется для управления величиной подаваемого напряжения и тока. При широтноимпульсной модуляции в качестве несущего колебания используется периодическая последовательность прямоугольных импульсов, а информационным параметром, связанным с дискретным модулирующим сигналом, является длительность этих импульсов [9].

Кроме того, известно, что метод широтно-модульной модуляции для управления мощностью нагрева пригоден только для инерционных объектов, собственные значения времени нагрева и остывания таких объектов должны быть гораздо больше периода ШИМ. С учетом этих двух направлений были внесены изменения в аппаратную часть автоматизированного блока управления и в прикладную программу управления автоматизированной системы TermoControl 3.1 Alpha.

Однако требуемая точность режимов нагрева, а, следовательно, и точность скоростей деформирования достигнута не была.

Решение проблемы инерционности предложенной автоматизированной системы стало возможным только путем внесения специальных прогнозных алгоритмов в прикладную программу управления процессом.

Если есть выбор, всегда разумнее полагаться на инерцию – это величайшая сила на свете.

Рекс Стаут

Наиболее действенным, с точки зрения решения вопроса инерционности системы управления термоупругими прессами, является применение экстраполяционных алгоритмов прогнозирования хода установки в зависимости от величины подаваемого напряжения и длительности воздействия напряжения на контактах ТЭНов. Для решения данного вопроса были проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования по определению длины хода различных типов термоупругих прессов и термокомпрессионных установок при различных условиях подачи питающего напряжения и температурных условиях нагрева. Проблема заключалась в том, что величина хода каждого конкретного термоупругого пресса является индивидуальной и зависит от конструктивных особенностей деталей установки, материалов, из которых изготовлены силовые и подвижные элементы установки, от коэффициентов термического расширения материала штамповой оснастки и т.д. На основе результатов проведенных экспериментов и теоретических расчетов создана обширная база данных прогнозируемого удлинения рабочих частей устройств по различным типам установок, которая обеспечивает довольно точное прогнозирование изменения величины хода и скорости деформирования. Данный алгоритм обеспечил точное управление термокомпрессионной установкой автоматизированной системой управления, схема которой представлена на рис. 1. Температура в зоне нагрева отклонялась от заданной на величину $\leq 2...4$ °С, что является довольно высоким показателем, обеспечивающим точное соблюдение температурно-скоростных режимов деформирования.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что основной проблемой, влияющей на точность соблюдения заданных температурно-скоростных параметров деформирования на термоупругих прессах и термокомпрессионных установках при использовании автоматизированной системы управления, является инерционность системы. Несоблюдение точных температурно-скоростных режимов деформирования в условиях штамповки деталей из металлических материалов в состоянии сверхпластичности или в условиях изотермической штамповки приводит к потере устойчивости полотна заготовки, изменению характера течения металла и формированию дефектов формы в виде утяжин, складок, зажимов, что является неисправимым браком.

Выявлено, что инерционность системы обусловлена конструкционными особенностями термоупругих пресов и термокомпрессионных установок. Определено, что основным и наиболее эффективным методом решения проблемы инерционности является применение цифровых экстрополяционных алгоритмов кратковременного прогнозирования поведения системы. В результате проведенных исследований были внесены изменения в прикладную программу управления автоматизированной системой управления работой термоупругих пресов и, в итоге, была создана новая усовершенствованная версия программы TermoControl 3.7 Alpha.

Данное программное обеспечение, с учетом внесенных в него изменений, позволяет получить высокую точность соблюдения температурно-скоростных параметров штамповки в состоянии сверхпластичности и в условиях изотермической штамповки с точностью нагрева до 2...4 °С и точностью соблюдения скоростного параметра (скорости деформирования) до $0,1 \times 10^{-3}$ мм/с

Технологии создания точных температурно-скоростных режимов деформирования, позволяющие получать сложные изделия в режимах изотермической штамповки, были реализованы для получения бездефектных авиационных оробренных панелей и обечаек из алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg, таких как Д1 и Д16, а также высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu, таких как В95 и В96ц.

Список литературы

1. Китаева Д.А., Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И. Температурно-скоростное деформирование алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57. № 2. С. 182-189.
2. Золотаревский Ю.С., Паняев В.А., Рудаев Я.И. и др. Сверхпластичность некоторых алюминиевых сплавов // Судостроительная промышленность. Сер. Материаловедение. 1990. Вып. 16. С. 21-26.
3. Волхонский А.Е., Ковалевич М.В., Гончаров А.В. Применение эффекта сверхпластичности – новые возможности в современных процессах металлообработки // Образовательные технологии. 2014. № 4. С. 120-128.
4. Галкин В.И. Новые эффективные методы производства изделий из волокнистых композиционных материалов. М.: МАТИ, 1997. 67 с.
5. Жаров М.В. Информационно-измерительная система для управления производственным процессом на термокомпрессионном технологическом оборудовании // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 63. с. 116-121.
6. Жаров М.В. Информационная система управления производственным процессом на термокомпрессионном технологическом оборудовании // Технология Машиностроения. 2018. № 03. с. 68 – 73.
7. Галкин В.И., Палтиевич А.Р., Шелест А.Е. Моделирование и оценка причин возникновения дефектов в процессе изотермической штамповки оробренных панелей из алюминиевых сплавов // Вестник МАИ. 2017. № 3. с. 170-178.
8. Галкин В.И., Васильев В.А., Палтиевич А.Р., Борунова Т.И., Шелест А.Е. К вопросу о возможности управления процессом изотермической штамповки бездефектных оробренных панелей из сплава 1420 // Технология легких сплавов. 2017. № 1. с. 84-90.
9. Шевцов Д.А., Полетаев А.С. Многофазные широтно-импульсные модуляторы для устройств с многоканальным принципом преобразования электроэнергии // Вестник МАИ. 2018. № 1. с. 180-189.

Жаров Максим Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры *TiСАПРМП ФГБОУВО «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет)*.
E-mail: MaximZharov@mail.ru

Winnum и ТОО «Казцинк» успешно завершили проект по внедрению системы мониторинга станков

Компания-разработчик решений для Industrial Internet of Things (IIoT) Winnum объявила об успешном завершении проекта по внедрению системы мониторинга станков на промышленном предприятии ТОО «Казцинк» - одного из лидеров цветной металлургии Казахстана. Ключевым направлением работы стало внедрение системы мониторинга производственного оборудования Winnum Станки.

Задачей проекта стояло увеличение загрузки оборудования с обеспечением требуемого качества и контроль его технического состояния. Внедрение данного решения позволило полностью автоматизировать сбор данных от оборудования, централизовать хранение управляющих программ и их передачу на оборудование. Также проект дал возможность дополнительно настраивать состояние оборудования для контроля работы станков в ручном режиме, который применяется при обработке заготовок, изготовленных методом литья и поковки. Все состояния создаются на основе

сигналов оборудования, собираемых в автоматизированном режиме.

Предприятие «Казцинкмаш» выпускает единичную и мелкосерийную продукцию, поэтому основной целью является не только увеличение загрузки оборудования, а обеспечение качества продукции за счет контроля технологических режимов и сокращение сроков переналадки на основе унификации режущего инструмента и оснастки. Такая аналитика невозможна без применения инструментов работы с Big Data и максимального исключения человеческого фактора при сборе данных.

Окупаемость внедрения системы составила 4 мес. - за это время удалось увеличить загрузку оборудования на 17% и значительно сократить время работы в ручном режиме, что позволило обеспечить постоянный контроль технологической дисциплины, что наиболее важно в ночные смены, и исключить нарушение режимов резания.

[Http://www.winnum.io](http://www.winnum.io)