

УДК 621.974:621.438

- Кресанов Ю. С.** канд. техн. наук, ведущий инженер АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)
- Качан А. Я.** д-р техн. наук, зав. кафедрой технологии авиационных двигателей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [opt.ugt@motorsich.com](mailto:opt.ugt@motorsich.com)
- Клочихин В. В.** главный металлург АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)
- Уланов С. А.** магистр кафедры технологии авиационных двигателей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [opt.ugt@motorsich.com](mailto:opt.ugt@motorsich.com)

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

**Цель работы.** *Повышение точности и качества заготовок деталей ГТД, получаемых горячей штамповкой.*

**Методы исследования.** *Системный анализ процесса горячей штамповки поковок и факторов, влияющих на их точность, качество и эффективность.*

**Полученные результаты.** *Проведенный системный анализ процесса горячей штамповки деталей ГТД показал, что он является сложной многофакторной и многофункциональной системой.*

*Актуальность работы по точной горячей штамповке поковок ГТД подтверждена проводимыми многочисленными зарубежными исследованиями, которые ввиду экономичности процесса широко внедряются в производство.*

*При анализе зарубежных публикаций дано определение и достижимые точности получаемых поковок, показана эффективность применения точной штамповки поковок.*

*Приведена количественная и качественная оценка точности получаемых поковок, характеризующаяся расходом металла и назначенными допусками на готовую деталь.*

*При проектировании технологического процесса горячей штамповки заготовок деталей ГТД для обеспечения высокой точности необходимо учитывать влияние многочисленных факторов, влияющих на точность, качество и эффективность процесса. Показаны требования, предъявляемые к исходной заготовке с учетом шероховатости и наличия измененного слоя поверхности, влияния объемной точности. Анализ нормативных материалов по пруткам в состоянии поставки показал необходимость их предварительной обработки. Изложены пути достижения необходимой объемной точности исходных заготовок.*

*Показано влияние размерной точности предварительной и промежуточной заготовок на точность и энергосиловые параметры последующего формообразования поковок. Показаны условия получения качественной поверхности поковок, которая ухудшается окислением функциональных поверхностей при нагреве, путем применения защитно-смазочных покрытий, удаления измененного слоя при различных видах обработки; предъявлены требования к нагревательному оборудованию.*

*Проанализировано применяемое при штамповке деформирующее оборудование и показано его существенное влияние на точность получаемых поковок; показано необходимое оптимальное оборудование.*

*Показано, что для оснастки при точной штамповке необходимо применение специальных материалов, так как широко распространенный материал для штампов показывает их полную непригодность для осуществления процесса.*

*Представлен высокопрочный материал для оснастки, выдерживающий высокие тепловые и силовые нагрузки, и показаны условия его применения.*

*На основании проведенных исследований даны рекомендации для повышения точности поковок, получаемых горячей штамповкой.*

**Научная новизна.** *Показано, что процесс точной горячей штамповки заготовок деталей ГТД является многофакторным и многофункциональным. Определено влияние каждого из факторов и в совокупности на точность, качество и экономическую эффективность получения прецизионных поковок.*

**Практическая ценность.** *Предложены рекомендации, учитывающие влияние различных факторов на получение точной, качественной и эффективной поковки, что позволяет изготавливать детали ГТД высокого уровня качества и экономической эффективности.*

*На основании проведенных исследований на АО «Мотор Сич» успешно реализовано изготовление лопаток компрессора из титановых жаропрочных никелевых сплавов и нержавеющей сталей с существенным экономическим эффектом, позволяющим помимо снижения трудоемкости изготовления при максимальной программе выпуска ГТД сократить расход материала только на титановом сплаве VT8 на 117 кг на один моторокомплект.*

**Ключевые слова:** поковка; точность; заготовка; деталь, коэффициент; штамп; оборудование.

## ВВЕДЕНИЕ

В авиадвигателестроении используется большое разнообразие применяемых для горячей деформации материалов, достигающее более 140 марок, которые включают конструкционные и нержавеющей стали, цветные, титановые и жаропрочные сплавы.

Эти материалы имеют обширный комплекс свойств и характеристик, обеспечивающих прочностную надежность авиадвигателей в большом диапазоне циклических и длительных силовых нагрузок при высоких температурах.

В настоящее время составляющая затрат на материалы, особенно на титановые, алюминиевые и жаропрочные никелевые сплавы, увеличилась при производстве авиадвигателей в 2 раза и достигает 60% стоимости всего изделия [2].

Актуальным является минимизация ресурсов при получении поковок. Точная горячая штамповка поковок с готовыми функциональными поверхностями или с минимальными припусками под дальнейшую механическую обработку позволяет снизить расходы материала и получить экономическую эффективность.

## 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Существующие нормативы (ГОСТ, ОСТ, ИСО, ДИН и др.) по проектированию поковок при обычной горячей штамповке устанавливают экономически достижимые припуски и допуски на их изготовление, относящиеся к определенному оборудованию и материалам, которые на 50...80 % больше, чем при точной штамповке.

Точноштампованные поковки можно разделить на две группы точности: к первой группе относятся детали, по форме и размерам максимально приближенные и имеющие допуски готовой детали без припуска на механическую обработку, и ко второй, — имеющие малые припуски по функциональным поверхностям, с допусками, отличающимися от допусков готовой детали. Припуск, удаляемый с поверхности точноштампованных поковок при механической обработке, имеет постоянную толщину для поковок первой группы, и переменную для второй. Для получения требуемой эффективности механической обработки точноштампованных поковок второй группы припуск по обрабатываемым поверхностям должен быть не более 0,3...0,4 мм. При

требовании получения поверхности точных поковок с шероховатостью менее 0,63 мкм, на такие поверхности необходимо назначать припуск, обеспечивающий получение требуемой шероховатости механической обработкой. Такой малый припуск приводит к ужесточению требований к качеству поверхности точноштампованных поковок, которая характеризуется глубиной изменяемого слоя, шероховатостью, глубиной поверхностных дефектов (трещин, вмятин, наслоений и др.).

В иностранных источниках дано определение поковок, получаемых точной штамповкой. При обычной штамповке точность поковок едва достигает допустимых отклонений по классам качества F и E (14 класс) по нормативам DIN7526, DIN7151 или ISO. Точными называют поковки, на многих участках которых приняты более жесткие допуски, чем предусмотрены классами F и E, и вместо нескольких операций резания их подвергают операциям различного вида шлифования (механическое, электрополирования, травления). Используется также определение — прецизионные поковки, имеющие необрабатываемые точные функциональные поверхности, на которых, например, на лопатках турбин достигается точность по ISO до IT7, с шероховатостью поверхности менее 3 мкм. Применительно к точным поковкам применяют также термины NNS (Near Net Shape) и «net-shape-forming», свидетельствующие о процессах получения поковок, близких к форме и допускам готовой детали. Начало использования системы NNS впервые положено в авиационной промышленности при получении поковок из титановых, жаропрочных и сверхпрочных сталей и сплавов, представляющих трудности при их обработке [3, 4].

Точная штамповка, предусматривающая применение калибровки поковок, позволяет на 50 % ужесточить допуски по сравнению с классами IT16...IT14. Например, прецизионная горячая штамповка зубчатых колес дает возможность получить точность IT10...IT8 с шероховатостью поверхности менее 25 мкм, а особых случаях и 10 мкм [3, 5, 6].

## 2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Повышение точности и качества заготовок деталей ГТД, получаемых горячей штамповкой.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### Точность поковки, характеризуемая расходом металла

Коэффициент точности поковки (КТП) определяет удаляемый металл при механической обработке (резанием, фрезерованием, шлифованием и пр.)

$$КТП = \frac{M_{\partial}}{M_n} < 1,$$

где  $M_n$  – масса поковки.

Наиболее объективным коэффициентом точности поковки было бы отношение массы упрощенной детали к массе поковки:

$$КТП = \frac{M_{уд}}{M_n}.$$

КТП показывает, насколько напуски, припуски и допуски поковки приближены к форме окончательной детали, т.е. степень совершенства проектирования поковки. КТП для штампованных поволок деталей машиностроения составляет в среднем 0,33...0,47. В зависимости от средней конструктивной сложности и габаритов деталей точность поволок в условиях крупносерийного производства определяется следующими граничными значениями коэффициента КТП: для поволок повышенной точности – 0,8...0,9, для точных – 0,9...10,95 и 0,96...1,0 – для особо точных [7]. Эти значения КТП не могут служить универсальным показателем для поволок различных конструктивных групп деталей, имеющих разную сложность, габаритные размеры, соотношение необрабатываемых и обрабатываемых поверхностей, масштабы производства, способы получения готовых деталей и технические условия. Поэтому, например, в авиадвигателестроении, где детали имеют малый коэффициент сложности конструкции (КСК), сложную ажурную пространственную конструкцию, КТП не может достигать даже значения 0,8. Таким образом, КТП выражает, в первом приближении, действительную точность штампованных поволок, показывающий не только снижение припусков на механическую обработку, но и степень отклонения полученных размеров от готовой детали, а также уровень кузнечно-штамповочного производства.

#### Факторы, влияющие на точность поволок

Стабильность и точность геометрических размеров штампованной поволоки при необходимом качестве поверхности и структуры металла являются многофункциональной зависимостью, на которые влияют: деформирующее оборудование; конструкция, материал и жесткость штампов, имеющих высокую износостойкость; точность объемов исходных и промежуточных заготовок и их формы; условия нагрева заготовок под деформацию и др.

#### Исходная заготовка

Точная горячая штамповка предъявляет высокие требования к массе исходных заготовок, которая не должна превышать  $\pm 0,5\%$ .

Поставляемый по нормативной документации исходный горячекатаный, кованый или прессованный прутки, который в большинстве используется при горячей штамповке, имеет отклонения по массе (диаметру), не удовлетворяющие условиям точной штамповки.

Например, изменение массы горячекатаного прутка диаметром 10 мм на единицу длины при обычной точности (допуск  $+0,3/-0,5$  мм) составляет 11%, а при повышенной точности (допуск  $+0,2/-0,3$  мм) – 9%. Резка прутка этого диаметра приводит к изменению массы исходной заготовки до 13...17%. Даже при допуске механически обработанного прутка диаметром 20 мм и длиной  $60 \pm 1,5$  мм в пределах  $-0,28$  мм изменение объема составляет 8%. Резка прутков на индивидуальные заготовки, независимо от способа резки, имеет также невысокую точность. Например, допуск на длину 150 мм прутка диаметром 40 мм при резке на пресс-ножницах составляет  $\pm 1,5$  мм, на дисковых пилах, механических ножовках, анодно-механических и абразивных станках –  $\pm 1,0$  мм и на фрезерных –  $\pm 0,6$  мм. Кроме того, после резки заготовки могут быть скошенные торцы, вмятины, утяжины, заусенцы и пр.

Кроме того, прутки, полученные горячей деформацией, имеют грубую шероховатость со следами надиров, заводов, вмятин и пр., а также измененную обезуглероженную или обезлегированную поверхность на глубину до 0,4...0,6 мм. Для точной штамповки поволок исходная заготовка должна иметь шероховатость не хуже  $R_a = 6,3$  мм и  $R_a = 3,2$  мм при высокоскоростной штамповке, иметь перпендикулярность торцов к оси не более  $3^\circ$ .

Точное объемное дозирование индивидуальных заготовок достигается дифференциацией отрезаемой длины по фактическим диаметрам; применением автоматических дозирующих устройств, изменяющих длину отрезаемых заготовок в зависимости от сечения профиля; механической обработкой, удаляющей также измененный по химсоставу слой, достигающий для углеродистых сталей толщины до 0,6 мм, а для титановых сплавов на диаметре прутка до 50 мм – 35 мм.

#### Предварительная заготовка

Размерная точность и форма предварительной заготовки (ПЗ) также оказывают существенное влияние на удельную нагрузку и точность штампованных поволок (рис. 1, 2), которая достигается за счет рациональных подготовительно-заготовительных операций фасонирования.

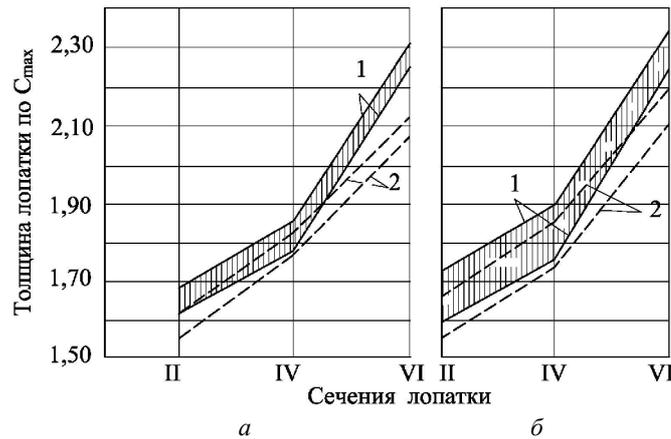


Рисунок 1. Изменение  $C_{max}$  пера лопатки при точной штамповке (1) и калибровке (2): а – размах распределения толщины индивидуальной заготовки 0,5 мм; б – то же – 0,92 мм

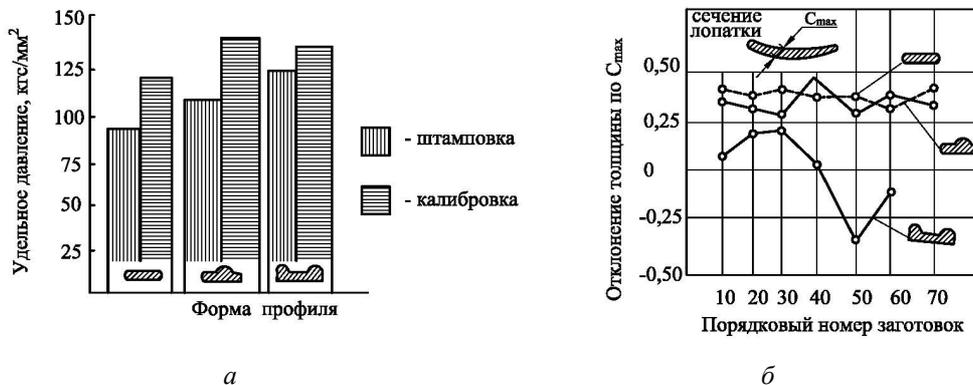


Рисунок 2. Влияние формы пера предварительной заготовки на удельное сопротивление деформированию (а) и точность изготовления пера лопаток по  $C_{max}$  (б) при штамповке [7]

При перераспределении масс металла по сечениям ПЗ используются различные методы формообразующих операций, выполняемых за один или несколько переходов: штамповкой на прессах, высадкой на горизонтально-ковочных машинах; электровысадкой, выдавливанием, периодической и поперечно-клиновой прокаткой, вальцеванием и др. [1]. Рациональная форма ПЗ позволяет также избежать излишних потерь металла, увеличить стойкость инструмента и обеспечить благоприятную степень деформации, способствующую получению оптимальной структуры.

#### Фактор нагрева заготовок перед деформацией

При точной штамповке многие функциональные поверхности поковки не подвергаются последующему удалению металла с их поверхности. Поэтому процесс окисления материала заготовки при нагреве под последующую деформацию принимает особое значение и его необходимо учитывать при разработке технологического процесса.

Нагрев под горячую деформацию приводит к окислению металлов, зависящему от длительности и температуры нагрева, физико-химических

свойств материала, состояния поверхности заготовки и состава нагреваемой атмосферы. Например, при обычном печном нагреве углеродистых сталей в результате окисления теряется до 4% металла, при котором толщина окалины при длительном нагреве может достигать до 46 мм и более. Такая окалина внедряется в тело поковки, ухудшает заполняемость инструмента и качество поверхности, одновременно снижая КИМ. На характер окисления оказывает также состояние поверхности, когда повышение шероховатости увеличивает окисляемость. Если величина обезуглероженного слоя, имеющегося на горячекатаном прутке в состоянии поставки находится в пределах 0,3...0,6 мм, то при последующем нагреве его толщина увеличивается на 30...50%.

Окисление низколегированных и углеродистых сталей приводит к существенному ухудшению механических свойств, снижает предел выносливости, ухудшает прокаливаемость, увеличивает склонность к трещинообразованию при закалке, приводит к короблению и расслоению при последующей горячей обработке.

Например, титановые сплавы при окислении образуют альфирированный слой, который имеет высокую, достигающую до HRC 60 и более, твердость. Этот слой резко снижает пластичность и свойства материала, вызывая при горячей осадке или растяжении на поверхности поковок многочисленные трещины.

Для устранения или уменьшения окисления при нагреве заготовок под деформацию применяются методы малоокислительного и безокислительного нагрева в печах с защитной атмосферой и вакууме, индукционный, электроконтактный и электролитный нагрев, использование защитно-смазочных покрытий. Однако, применяемые методы защиты металлов от окисления не позволяют полностью исключить образование дефектного слоя (кроме нагрева и деформации в вакууме), который дополнительно появляется при переносе заготовки от печи к деформирующему оборудованию. В связи с этим, для точноштампованных поковок необходимо применение специальных методов очистки поверхности: травление, электролитно-плазменная обработка, пескоструйная обдувка, шлифование и др.

Для повышения точности поковок помимо дозирования объема исходной заготовки необходимо также строго соблюдать стабильность и равномерность ее нагрева по сечению. Эту температуру необходимо сохранять на протяжении всего процесса деформации. Для этого необходимо поддержание температурного градиента в печном пространстве в пределах  $5^{\circ}\text{C}$ .

### **Деформирующее оборудование**

Размерная точность поковок, стойкость инструмента и другие показатели в значительной степени зависят от параметров технологического оборудования. Специфика процессов точной штамповки обуславливает необходимость рационального использования имеющихся процессов и создания специализированного оборудования, обладающего определенными кинематическими, жесткостными и энергетическими характеристиками.

Для горячей и полугорячей объемной штамповки в нагретых штампах применяется различное оборудование: кривошипные, винтовые и гидравлические прессы и другое оборудование, выбор которых обуславливается характером выполняемых процессов.

К оборудованию, используемому для точной горячей штамповки, предъявляется ряд специфических требований:

- максимальная жесткость и мощность прессы;
- минимальные зазоры в направляющих и возможность их регулировки;
- минимальная длительность процесса деформации поковки, за исключением процесса штамповки в изотермических условиях;

- наличие и точность регулирования энергии деформации.

Кривошипные горячештамповочные прессы (КГШП) мало или совсем не пригодны для штамповки поковок с тонкими, толщиной  $0,3...0,5$  мм, полотнами, геометрические погрешности которых по высоте достигают  $1,25$  мм и более. Например, для КГШП номинальной силой  $1,6...2,3$  МН величина упругой деформации системы станина-ползун-кривошипно-шатунный механизм находится в пределах  $6...10$  мм [8].

Наиболее эффективным оборудованием, отвечающим условиям точной штамповки поковок с тонкими полотнами, например, лопаток компрессора ГТД, являются винтовые прессы с фрикционным, электро- и гидровинтовым приводами, которые в конце хода ползуна имеют максимальную силу и жесткость. Так как штамповка на этих прессах осуществляется путем полного расхода накопленной энергии деформации поковок или замыканием верхнего и нижнего штампов через ограничительные упоры, то жесткость системы ползун-винт-станина не оказывает влияния на точность поковок, когда упругой деформации подвержен только инструмент. Вместе с этим винтовые прессы в отличие от КГШП имеют возможность регулирования энергии деформации, отличаются малым ( $0,03$  с) временем контакта деформируемой заготовки с относительно холодным инструментом, что увеличивает не только стойкость штампов, но и оптимизирует условия деформации.

Отмеченные достоинства винтовых прессов способствовали их широкому использованию при формообразовании точных поковок, особенно имеющих тонкие полотна, к которым относятся лопатки ГТД.

### **Штампы и штамповая оснастка**

Широко используемые штамповые материалы типа 5ХНМ, 4ХЧМФС, 4Х5В2МФС, термообработанные на твердость HRC 43...45, имеющие сопротивление удельному нагружению в пределах  $800...1500$  МПа, оказались не пригодны для точной штамповки поковок с тонкими полотнами, особенно лопаток компрессора ГТД.

Например, при точной штамповке поковок даже простой формы 60% отклонений от заданных форм вызвано пластической и упругой деформациями штампа и лишь 23% случайными колебаниями размеров, возникающих из-за изменения предела текучести деформируемого металла поковки, коэффициента трения и других технологических факторов.

Пластическая деформация штампов из стали 5ХНМ и др. достигает  $0,35...0,5$  мм уже при получении 5...10 поковок лопаток турбины из стали 20Х13 [9], а при точной штамповке лопаток компрессора ГТД из стали 14Х17Н2 длиной до

100 мм в штампах из стали 4ХЧМФС (ДИ22) смятие гравюры произошло уже на первых поковках, имеющих даже большую толщину, чем требуется чертежом.

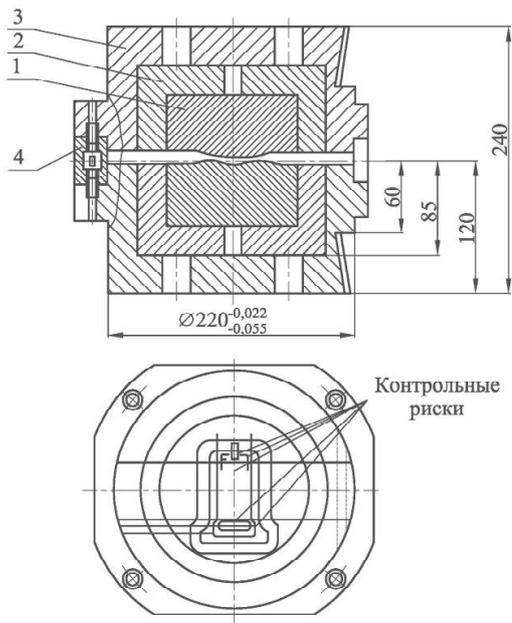
Эти обстоятельства вынуждают принять для точной штамповки инструмент из более твердых и высокопрочных материалов, например сталей типа Р18, Р6М5, Р9М4К8 и др.

Эти материалы при рабочих температурах порядка 650...750°С имеют высокую (более HRC 60) твердость и превосходно выдерживают удельную нагрузку при сжатии, достигающую 40 ГПа.

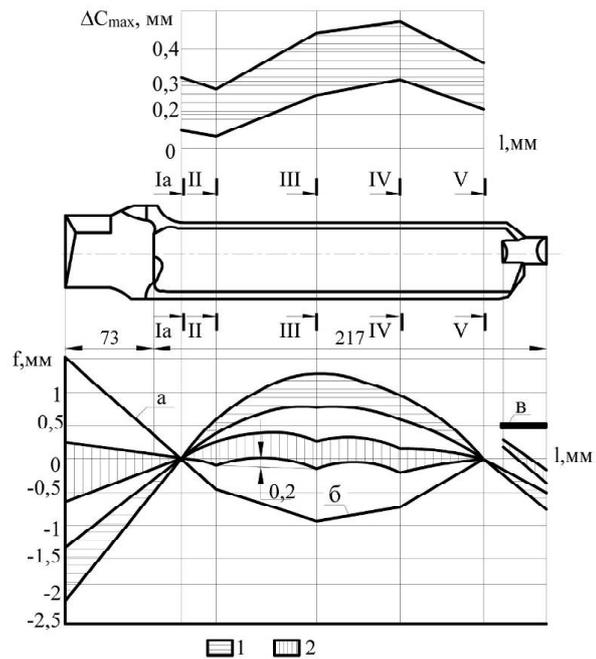
Ударная вязкость сталей типа 4ХЧМФС составляет более 50 Дж/см<sup>2</sup>, а быстрорежущих сталей типа Р18, Р6М5 и др. всего 4,2 Дж/см<sup>2</sup>. Такие характеристики пластичности быстрорежущих сталей не позволяют их применять в штампах обычной конструкции.

Материалы, имеющие высокую прочность, но низкую пластичность, могут сопротивляться приложенной нагрузке только при условии создания на их поверхности сжимающих напряжений, величина которых должна превосходить напряжения, возникающие в полости инструмента при деформации поковки. Такие напряжения создаются в специальных штампах напряженной конструкции (рис. 3 [1]).

Неравномерное распределение удельных нагрузок по гравюре штампа, особенно возникающих при точной штамповке, а также необходимость строго выдерживать малые допуски, требуют корректировки геометрии полости инструмента на величину упругой деформации (рис. 4 [9]).



**Рисунок 3.** Штамп напряженной конструкции:  
1 – вставка; 2 – внутренняя обойма; 3 – наружная обойма; 4 – ограничительное кольцо



**Рисунок 4.** Прогиб и толщина пера по  $C_{max}$  при точной штамповке лопаток турбины: до (1) и после (2) коррекции ручья штампа по хвостовику (а), перу (б) и технологической бобышке (в)

Величина упругой деформации штампа, отнесенная к единичной площади, по формуле Бусинекса равна:

$$\varepsilon_y = \frac{P_i(1 - \lambda^2)}{\pi ES}$$

где  $P_i$  – удельное давление в месте определения упругой деформации;

$\lambda$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости;

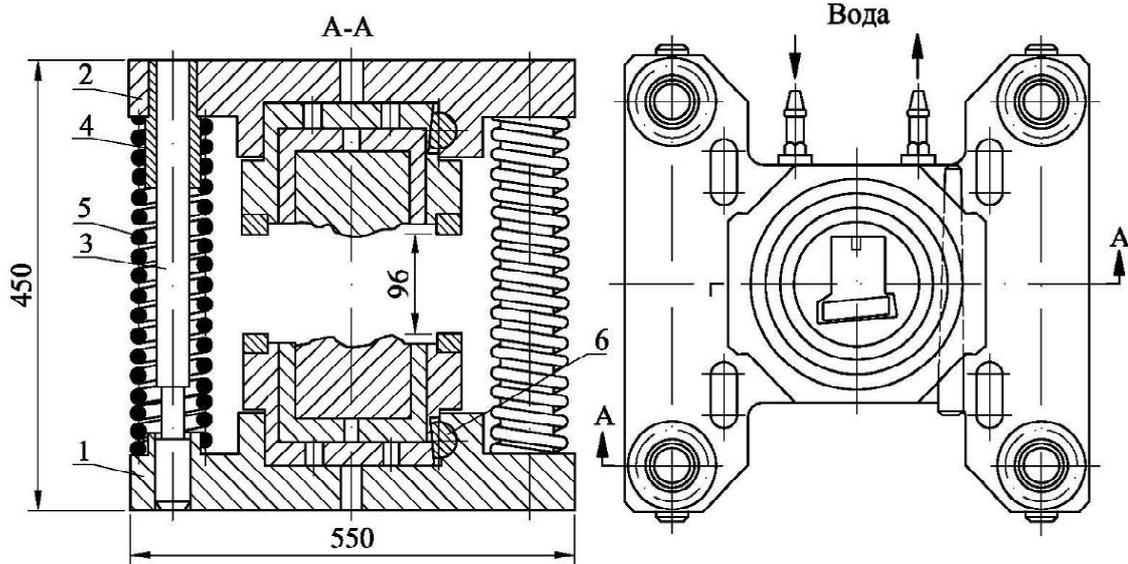
$S$  – расстояние от точки приложения силы до точки, в которой определяется упругая деформация.

А для увеличения точности поковок при горизонтальном и поперечном смещении штампов (при отсутствии точных направляющих в прессе) необходимо штамп напряженной конструкции устанавливать в специальный блок, имеющий направляющие колонки (рис. 5).

### ВЫВОДЫ

Проведенный анализ условий реализации процесса точной горячей штамповки деталей ГТД показал, что он является сложной многофункциональной системой, в которой необходимо обязательно предусматривать:

- специальную подготовку поверхности исходной заготовки с минимизацией отклонений по массе при получении промежуточной заготовки;



**Рисунок 5.** Штамповый блок: 1, 2 – нижняя и верхняя плиты; 3 – направляющая колонка; 4 – втулка; 5 – пружина; 6 – клин. Отверстия для водяного охлаждения плит не показаны

- эффективное проектирование предварительной заготовки, предназначенной для дальнейшей штамповки, с целью снижения удельных нагрузок и повышения точности поковки;

- специальные условия нагрева заготовок под деформацию и требования осуществления процесса в узком температурном интервале штамповки;

- защиту заготовок от окисления при нагреве или применение специальных методов удаления измененного слоя с поверхности поковки;

- использование специального деформирующего оборудования, уменьшающего время контакта с поковкой и позволяющего осуществление необходимой регулировки энергии деформации;

- применение инструмента высокой прочности (твердости) и работоспособности при температуре деформации поковки, предполагающего использование штампов напряженной конструкции.

Несмотря на необходимость выполнения требований, предъявляемых к реализации процесса точной штамповки деталей ГТД, она представляется эффективным технологическим процессом получения поволоков, особенно имеющих сложную геометрию (например, лопаток турбин и компрессоров), снижающим расход дорогостоящего материала и трудоемкость механической обработки детали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Точная горячая штамповка деталей ГТД. Монография. / Богуслаев В.А., Кресанов Ю. С., Ка-

чан А. Я., Клочихин В. В., Чигиринский В. В. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2017. – 563 с.

[2]. Чуйко В. М. 10-й Международный салон «Двигатели-2008» станет крупным событием / В. М. Чуйко // Новости десятого международного салона «Двигатели-2008». – Изд-во газеты «Аэромедия». – 2008. – № 1.

[3]. Warm forging produces close finished tolerances and related economy // «Jud. Heat». – 1987. – 54, № 6. – P. 32–33.

[4]. MatsushitaTomiharu. Improvement of equipment for close-tolerance forging and extrusion in Japan / J. Mates. // Process. Technol. – 1990. – 22, № 3. – P. 223–238.

[5]. Linder Heinrich «Prazisionsshmieden» / Linder Heinrich // «Thyssen. Tech. Ber.». – 1984. – 16, № 2. – P. 105–109.

[6]. Dohmann F. «Überlegungen zur Werkzeugtechnik bei Prazisionsumformverfahren» / Dohman F. // «Werkstattstechnik». – 1984. – 74, № 4. – P. 201–205.

[7]. Евланов Н. Г. Совершенствование технологии изготовления точных поволоков методами горячего деформирования / Н. Г. Евланов // Материалы совещания. – М. : НИАТ, 1966. – С. 22–40.

[8]. Игнатов А.А. Кривошипные горячештамповочные прессы: изд. 3-е перераб. / А. А. Игнатов, Т. А. Игнатова. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.

[9]. Шастин Э. Г. Точная штамповка лопаток газовых турбин / Э. Г. Шастин // Энергомашиностроение. – 1984. – № 8. – С. 23–24.

*Статья поступила в редакцию 30.03.2018*

<b>Кресанов Ю. С.</b>	канд. техн. наук, ведучий інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: <a href="mailto:tb.ugmet@motorsich.com">tb.ugmet@motorsich.com</a>
<b>Качан О. Я.</b>	д-р техн. наук, зав. кафедри технології авіаційних двигунів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: <a href="mailto:opt.ugt@motorsich.com">opt.ugt@motorsich.com</a>
<b>Клочихин В. В.</b>	головний металург АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: <a href="mailto:tb.ugmet@motorsich.com">tb.ugmet@motorsich.com</a>
<b>Уланов С. О.</b>	магістр кафедри технології авіаційних двигунів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: <a href="mailto:opt.ugt@motorsich.com">opt.ugt@motorsich.com</a>

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ І ЯКОСТІ ГАРЯЧЕШТАМПОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

**Мета роботи.** Підвищення точності і якості заготовок деталей ГТД, які отримують гарячим штампуванням.

**Методи дослідження.** Системний аналіз процесу гарячого штампування поковок і факторів, що впливають на їх точність, якість і ефективність.

### **Отримані результати.**

Проведений системний аналіз процесу гарячого штампування деталей ГТД показав, що він є складною багатофакторною і багатофункціональною системою.

Актуальність роботи з точного гарячого штампування поковок ГТД підтверджена проведеними численними закордонними дослідженнями, які через економічність процесу широко впроваджуються у виробництво.

При аналізі закордонних публікацій дано визначення і досяжні точності одержуваних поковок, показано ефективність застосування точного штампування поковок.

Приведено кількісну і якісну оцінку точності одержуваних поковок, що характеризується витратою металу і призначеними припусками на готову деталь.

При проектуванні технологічного процесу гарячого штампування заготовок деталей ГТД для забезпечення високої точності необхідно враховувати вплив численних факторів, що впливають на точність, якість і ефективність процесу. Показано вимоги, пропонувані до вихідної заготовки з урахуванням шорсткості і наявності зміненого шару поверхні, впливу об'ємної точності. Аналіз нормативних матеріалів по прутках у стані поставки показав необхідність їх попередньої обробки. Викладено шляхи досягнення необхідної об'ємної точності вихідних заготовок.

Показано вплив розмірної точності попередньої і проміжної заготовок на точність і енергосилові параметри наступного формоутворення поковки. Показано умови отримання якісної поверхні поковок, що погіршується окислюванням функціональних поверхонь при нагріванні, шляхом застосування захисно-мастильних покриттів, видалення зміненого шару при різних видах обробки; пред'явлено вимоги до нагрівального устаткування.

Проаналізовано застосовуване при штампуванні деформуюче устаткування і показано його істотний вплив на точність одержуваних поковок; показано необхідне оптимальне устаткування.

Показано, що для оснащення при точному штампуванні необхідно застосування спеціальних матеріалів, тому що широко розповсюджений матеріал для штамів показує їх повну непридатність для здійснення процесу.

Представлено високоміцний матеріал для оснащення, що витримує високі теплові і силові навантаження, і показано умови його застосування.

На підставі проведених досліджень дано рекомендації для підвищення точності поковок, одержуваних гарячим штампуванням.

**Наукова новизна.** Показано, що процес точного гарячого штампування заготовок деталей ГТД є багатофакторним і багатофункціональним. Визначено вплив кожного з факторів і в сукупності на точність, якість і економічну ефективність отримання прецизійних поковок.

**Практична цінність.** Запропоновано рекомендації, що враховують вплив різних факторів на отримання точної, якісної і ефективною поковки, що дозволяє виготовляти деталі ГТД високого рівня якості і економічної ефективності.

На підставі проведених досліджень на АТ «Мотор Січ» успішно реалізовано виготовлення лопаток компресора з титанових жароміцних нікелевих сплавів і нержавіючих сталей з істотним економічним ефектом, що дозволяє крім зниження трудомісткості виготовлення при максимальній програмі випуску ГТД скоротити витрати матеріалу тільки на титановому сплаві ВТ8 на 117 кг на один моторокомплект.

**Ключові слова:** поковка; точність; заготовка; деталь; коефіцієнт; штамп; устаткування.

- Kresanov Yu. S.** Candidate of Engineering Science, Leading Engineer, Motor Sich JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com);
- Kachan A. Ya.** Doctor of Engineering Science, Head of Aircraft Engine Technology Department, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [opt.ugt@motorsich.com](mailto:opt.ugt@motorsich.com);
- Klochikhin V. V.** Chief Metallurgical Engineer, Motor Sich JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com);
- Ulanov S. A.** Magister of Aircraft Engine Technology Department, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [opt.ugt@motorsich.com](mailto:opt.ugt@motorsich.com)

## ASSURANCE OF ACCURACY AND QUALITY OF MANUFACTURE OF HOT-STAMPED GAS-TURBINE ENGINE PARTS

**Objective of the work.** Improvement of accuracy and quality of gas-turbine engine part blanks manufactured by hot stamping method.

**Investigation methods.** System analysis of forging hot stamping process and of the factors affecting their precision, quality and the process efficiency.

**Results obtained.** The conducted system analysis of the process of gas-turbine engine part blanks hot stamping testified that this process represents a multi-factor and multi-functioned system.

Relevance of the work on close tolerance hot stamping of gas-turbine engine part blanks is confirmed by a lot of investigations conducted in many countries and introduced into production due to high economical efficiency of the above process.

While analyzing the foreign publications, definition of precision of the forgings being obtained is given and its achievable values are presented, high efficiency of blank close tolerance stamping is demonstrated.

Provided was quantitative and qualitative assessment of precision of the forgings being obtained that is characterized by metal consumption and allowances assigned for ready-made parts.

In order to provide high precision when designing a production process of gas-turbine engine part blanks hot stamping, account must be taken of many factors influencing the process precision, quality and efficiency. Presented were requirements specified for primary blank with due regard to surface roughness and availability of the changed superficial layer, as well as volumetric accuracy influence. The analysis of standard documents on bars in as-received state demonstrated the necessity of their preliminary processing. The ways of achieving the necessary volumetric accuracy of primary blanks are laid down.

Demonstrated was influence of dimensional accuracy of primary and intermediate blanks over precision and energy-power parameters of subsequent shaping of forging. Specified are requirements for obtaining high-quality surface of forgings (that may be deteriorated by oxidation of functional surfaces at heating) by means of application of protective-and-lubricating coatings or removal of the changed layer using various kinds of processing; the requirements to heating equipment are specified.

Analyzed is the shaping equipment used at stamping, demonstrated is its significant influence over precision of the forgings being obtained; guidance as to optimum types of equipment to be used is given.

It is demonstrated that the jigs and fixtures used for close tolerance forging must be made of special materials, as the materials widely used for stamping dies are proved to be completely unusable for the process in question.

Presented is high-strength material for jigs and fixtures tolerant to high thermal and mechanical loads; conditions of its use are specified.

Based on the investigations conducted, recommendations on improvement of precision of forgings obtained by hot stamping are given.

**Scientific novelty.** *The process of hot close tolerance forging of gas-turbine engine part blanks is demonstrated to be a multi-factor and multi-functioned one. Determined is the influence of each factor and their combination over precision, quality and economical efficiency of precision forging manufacture process.*

**Practical utility.** *Proposed are recommendations with due regard for influence of various factors over obtaining precision, high-quality and economically efficient forgings making it possible to manufacture gas-turbine engine parts at high level of quality and economical efficiency.*

*On the basis of the investigations conducted, Motor Sich JSC has successfully implemented the process of manufacture of compressor blades of titanium and heat-resistant nickel-base alloys, as well as of stainless steels providing a significant economic benefit, making it possible, in addition to reduction of labour content, to reduce material consumption at maximum gas-turbine engine production program in the amount of 117 kg of BT8 titanium alloy per each engine.*

**Key words:** *forging; precision; blank; part; coefficient; stamping die; equipment.*

## REFERENCES

- [1]. Boguslayev V. A., Kresanov Y. S., Kachan A. Ya., Klochikhin V. V., Chigirinsky V. V. (2017). *Tochnaya Goryachaya Shtampovka Detaley GTD. Monographiya. Zaporozhye: AO «MOTOR SICH», 563.*
- [2]. Chuiko V.M. (2008). 10-j Mezhdunarodniy salon "Dvigateli–2008" stanet krupnim sobyitiem. *Novosti desyatogo mezhdunarodnogo salona "Dvigateli–2008": Izd-vo gazety "Aeromedia", 1.*
- [3]. (1987). Warm forging produces close finished tolerances and related economy: *Jud. Heat. 54, 6, 32–33.*
- [4]. Matsushita Tomiharu, J. Mates. (1990). Improvement of equipment for close-tolerance forging and extrusion in Japan. *Process. Technol, 22 (3), 223–238.*
- [5]. Linder Heinrich (1984). *Prazisionsshmieden. Thyssen. Tech. Ber. 16(2), 105–109.*
- [6]. Dohmann, F. (1984). *Uberlegungen zur Werkzeugtechnik bei Prazisionsumformverfahren. Werkstattstechnik, 4, 201–205.*
- [7]. Yevlanov N. G. (1966). *Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya tochnykh pokovok metodami goryachego deformirovaniya. Materialy soveshaniya, Moscow, NIAT, 22–40.*
- [8]. Ignatov A. A., Ignatova, T. A. (1984). *Krivoshi pnye goryacheshtampovochnye pressy: izd. 3-ye pererab., Moscow : Mashinostroyeniye, 312.*
- [9]. Shastin E. G. (1984). *Tochnaya shtampovka lopatok gazovykh turbin. Energomashinostroyeniye, 8, 23–24. (in Russian).*