

УДК 621.73.043.011

*М.Н. Багмет, канд. техн. наук, И.А. Жданов, инж., С.К. Колтун, студ.,
В.Н. Фандеев, инж.*

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ И СВЕРХПЛАСТИЧНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Введение

Способом прецизионной горячей объемной штамповки в течение многих лет изготавливают стальные детали, важные функциональные поверхности которых не подвергаются дальнейшей обработке [1]. Требуемое ужесточение допусков требует по сравнению со стандартной штамповкой значительно больших затрат, которые должны компенсироваться за счет экономии на стоимости обработки и материала.

Геометрически сложные детали из титановых сплавов и высокотемпературных сплавов (например, сплавы на основе никеля) являются большим потенциалом для снижения расходов вследствие высокой стоимости самих материалов и их обработки резанием. Поэтому было предложено обрабатывать эти материалы прецизионной горячей объемной штамповкой (технология, обеспечивающая получение изделий заданной или примерно заданной формы).

Постановка задачи и цель исследования

Технология, разработанная для стали, для новых материалов [2] только частично обеспечила получение удовлетворительных результатов, так как эти материалы обладают высоким сопротивлением деформации в очень узком диапазоне ковочных температур.

Как правило, расходы на изготовление и износ штампов при прецизионной горячей объемной штамповке под молотами, механическими или винтовыми прессами были так велики, что стоимость изделий становилась неэкономичной. Это часто приводило к компромиссу при приближении к конечной форме и, следовательно, прецизионной поковки получить не могли.

При горячей объемной штамповке в штампах из стали предельная температура нагрева штампа составляет примерно 500...700 °С. Для того, чтобы значительно не превысить эту температуру при штамповке, штамп предварительно нагревают только до 200 °С, заготовка (температура при загрузке, например, 1150 °С) должна быть быстро окончательно отштампована при небольшом времени контакта под давлением для того, чтобы повышение температуры штампа было ограничено.

Охлаждение заготовки примерно на 600-1000 °С в более холодном штампе, а также высокая скорость деформации вызывают возрастание сопротивления деформации материала заготовки и ведут к затруднению заполнения полости штампа и к повышению износа штампа. Изделия с большой поверхностью требуют мощного кузнечно-прессового оборудования, которое соответственно дороже.

В середине 60-х годов в Технологическом исследовательском институте штата Иллинойс, США был

разработан способ изотермической горячей объемной штамповки титановых сплавов [3]. Новым являлось применение инструментальных материалов, которые дают возможность использовать сверхпластичность, связанную с низкой скоростью деформации [4-6]. В состоянии сверхпластичности материал становится очень мягким и пластичным, поэтому возможно произвести прецизионную штамповку повок сложной формы из сплавов на основе никеля или титана.

Целью данной работы является анализ состояния и принципов изотермической штамповки и штамповки в состоянии сверхпластичности жаропрочных сплавов.

Изотермическое деформирование. Принцип способа

Основным принципом изотермической горячей объемной штамповки является равенство температуры деформирования и штампа. Устраненная при этом потеря тепла заготовкой в штампе обеспечивает возможность медленной деформации при мягком, пластичном состоянии материала при относительно небольших усилиях деформации. Это дает возможность изготовления изделий с тонкими фасонными элементами на относительно небольших прессах.

Зависимость скорости от напряжения текучести, как правило, выражается следующей формулой:

$$k_f = C \cdot \varphi^m \quad (1)$$

где k_f – напряжение текучести;

m – экспонент скорости;

C – коэффициент;

$\varphi = v/h$ – скорость деформации, где h – соответствующая высота, v – скорость штампа.

Экспонент скорости m определяет зависимость скорости деформации и сопротивления деформации

$$m = \frac{\partial \log k_f}{\partial \log k_\varphi} \quad (2)$$

Для упрощенной оценки можно принять, что усилие деформации пропорционально напряжению текучести k_f . Зависимость усилий деформации может быть приближенно выражена:

$$\frac{F_k}{F_{is}} = \left(\frac{v_k}{v_{is}} \right)^m \quad (3)$$

где v – скорость штампа;

F – усилие деформации;

is – индекс для изотермической штамповки;

k – индекс для традиционной штамповки.

При горячей штамповке (диапазон температур $T_U = (0,4 - 0,8) \cdot T_m$, где T_U – температура деформации и T_m – температура плавления в К) для большинства металлических материалов m примерно равно 0,1 – 0,25.

Металлические материалы находятся в состоянии

сверхпластичности тогда, когда достигают величины m в пределах 0,3 – 0,8. Для $m = 0,5$ и $V_k/V_{is} = 0,01$ достигимо уменьшение усилия деформации в 10 раз.

Для изотермической горячей объемной штамповки или для деформирования в области сверхпластичности, следовательно, можно применять маленькие, относительно дешевые гидравлические прессы. С другой стороны, технология требует больших расходов по сравнению с традиционной горячей штамповкой: жаропрочных материалов штампов (например, сплавов на основе никеля до 900 °С, молибденовых сплавов до 1200 °С), мощной системы нагрева штампов, устройств для измерения и регулирования температуры штампа и заготовки, специальных систем смазки для особых условий деформирования, гидравлических специальных прессов для низких скоростей штамповки с системой охлаждения стола и ползуна, а также устройств для создания вакуума или защитной атмосферы при применении штампов из молибдена, эта атмосфера не требуется для штампов из сплавов на основе никеля.

Для возможности применения штампов из сплавов на основе никеля разработана технология штамповки в штампе, температура которого примерно на 200 °С ниже, чем температура поковки. Это требует более высокой скорости штампа или меньшего времени контакта под давлением.

Деформирование в состоянии сверхпластичности

Сверхпластичными металлические материалы называют в случае сильной зависимости напряжения текучести от скорости деформации $m = \frac{\partial \log k_f}{\partial \log k_\phi} \geq 0,3$ и

необычно низкого напряжения текучести при очень высокой способности к деформации.

Условия для возникновения сверхпластичности: температура деформации $T_U > 0,4T_m$, К; скорость деформации $\dot{\phi} = v/h$ относительно низка (при сверхпластичной штамповке обычно длительность контакта под давлением 1 – 30 мин), величина зерна меньше 10 – 20 мкм во время деформирования.

При сверхпластичной объемной штамповке особое значение имеют классы материала титановых сплавов на основе никеля. Эти сплавы обычно являются труднодеформируемыми (высокое сопротивление деформации, ограниченный диапазон кованых температур, реакция поверхности). С другой стороны, из определенных сплавов этих классов можно без особых затрат получать полуфабрикаты со сверхпластичными свойствами, например, из титанового сплава Ti-6Al-4V.

Штампы и штамповые материалы для изотермической штамповки

Штампы для изотермической штамповки отличаются от традиционных штампов для прецизионной штамповки применением жаропрочных материалов в качестве материалов штампа (сплавы на основе никеля, молибденовые сплавы при штамповке титановых сплавов или сплавов на основе никеля), нагревом штампов до температуры деформирования. Штампы для изо-

термической штамповки значительно дороже, чем соответствующие стальные штампы. Причина этого заключается главным образом в высокой стоимости штамповых материалов, наряду с этим в дополнительных расходах на контролируемый нагрев штампов и опору штампов, которая должна обеспечить возможность передачи усилий от стола прессы.

Для изотермической штамповки титановых сплавов требуется термостойкость в диапазоне примерно от 850 до 950 °С, при штамповке сплавов на основе никеля даже примерно до 1150 °С. Для такого диапазона температур в штампах применяют следующие материалы: высокотемпературные сплавы, главным образом сплавы на основе никеля; металлы или их сплавы с высокой температурой плавления (например, молибден); керамические материалы (например, нитрид кремния или карбид кремния).

Для изотермической штамповки титановых сплавов примерно при 850-900 °С пригодны только сплавы на основе никеля с максимальной теплостойкостью.

Значительным преимуществом применения сплавов на основе никеля в качестве материала штампов является то, что они обладают достаточно хорошей неокисляемостью при 900 °С и поэтому могут подвергаться изотермической штамповке без защитной атмосферы непосредственно на воздухе. Некоторые фирмы ограничили температуру штампа при изготовлении различных поковок примерно от 750 до 850 °С, однако сохранили температуру заготовок из титановых сплавов примерно в 950 °С и повысили скорость деформации. Другая тенденция развития направлена для титановых сплавов на применение сплавов, которые могут деформироваться при температурах от 750 до 850 °С – сплавов, близких к β -сплавам.

При изотермической штамповке сплавов на основе никеля признание получил молибденовый сплав TZM (титан-циркон-молибден). Процесс ковки при температурах ниже температур рекристаллизации TZM вызывает „упрочнение”, действие которого сохраняется примерно до 1200 °С (начало рекристаллизации).

С точки зрения теплостойкости и предела прочности на сжатие перспективны также такие керамические материалы, как карбид кремния и нитрид кремния. Однако, керамические материалы – хрупкие и не выдерживают пиков напряжений растяжения, возникающих при пластическом деформировании.

Смазочные материалы для изотермической штамповки

Требования к смазочным материалам для изотермической штамповки значительно отличаются от требований, предъявляемых к смазочным материалам для традиционной горячей объемной штамповки. Максимальные температуры на границах раздела выше (около 950 °С для титановых сплавов и 1150 °С для сплавов на основе никеля). При штамповке в заданный размер недопустима реакция с поверхностью заготовки (штампа), которая могла бы вызвать изменение свойств. Местное разрушение разделительного смазочного слоя между заготовкой и штампом приводит к (диффузионной) сварке заготовки со штампом и, как правило, вызывает повреждения.

В Западной Европе были созданы и испытаны соответствующие системы смазочных материалов для изотермической штамповки. Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют надлежащие смазочные материалы для изотермической штамповки титановых сплавов или сплавов на основе никеля.

Прессы для изотермической (сверхпластичной) объемной штамповки

Гидравлические прессы благодаря многосторонним возможностям регулирования их усилия, количества эффективных ходов и рабочих скоростей могут легко приспособляться к соответствующей технологии, материалу и его пластическим свойствам (деформируемости). При изотермической (сверхпластичной) объемной штамповке большое время контакта под давлением может быть достигнуто только на гидравлических прессах. Затруднительным является то, что при осуществлении технологии TZM весь пресс должен быть вакуум-плотно изолирован.

Заготовки для изотермической штамповки. Выбор заготовок

При сравнимых механических свойствах в последнее время решающим для применения способа штамповки является экономичность.

Известны примеры экономии на стоимости материалов у сильно структурированных заготовок примерно до 50%. При определении количества операций штамповки следует принять во внимание то, что зачастую готовая поковка может быть отштампована из заготовки за одну операцию.

Уменьшение потребного усилия при медленном изотермическом или сверхпластичном деформировании обеспечивает возможность обработки на очень маленьких прессах. Установки для изотермической штамповки по сравнению с традиционными прессами усилием от примерно 50000 кН являются настоящей альтернативой.

При изготовлении детали из Ti-6Al-4V применение изотермической или сверхпластичной прецизионной штамповки обеспечивает экономию примерно 30% на обработку резанием [5]. Этому потенциалу снижения расходов противостоят факторы удорожания изотермической штамповки за счет стоимости штампов. Большая длительность штамповки приводит к удорожанию процесса штамповки, изготовление прецизионных штампов с маленькими допусками требует повышения расходов на разработку конструкции для сведения брака к оправданным пределам.

Точный контроль процесса при изотермической штамповке обеспечивает получение поковок с однородными свойствами, т.е. снижение расходов на испытания. Для авиационной промышленности это является важным фактором безопасности и стоимости.

Исследования показали, что поковки из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученные изотермической штамповкой с окончательно обработанной поверхностью можно применять и при переменных нагрузках. При этом поверхность должна быть подвергнута дробеструйной обработке для получения высоких значений показателей усталостной прочности.

Поковки из титановых сплавов

В литературе описано большое количество экспериментальных поковок из титановых сплавов, изготовленных изотермической штамповкой или штамповкой в нагретых штампах. Среди них есть примеры, которые впечатляют большими возможностями формообразования, особенно в диапазоне сверхпластичности. Например, переднее колесо военного самолета диаметром 320 мм с толщиной стенки стойки только 32 мм и массой около 10 кг было отштамповано из Ti-6Al-6V-2Sn (высокотемпературный титановый сплав) за одну операцию при температуре 900-925 °С. Среднее удельное усилие составляло 124 МПа. Колесо было изготовлено в Технологическом исследовательском институте шта-та Иллинойс.

Поковки из сплавов на основе никеля

Фирма „Пратт и Уитни“ (США) - производитель приводных механизмов, разработала процесс штамповки, запатентованный под названием „Гаторайзинг“, использующий сверхпластичность сплавов на основе никеля. С помощью этого способа возможна объемная горячая штамповка в состоянии сверхпластичности турбинных дисков, причем их форма очень близка к заданной. Стоимость материалов и обработки благодаря этому значительно снижается. Полученная структура значительно однороднее, чем у отливок или поковок, полученных традиционной горячей объемной штамповкой.

Заключение

Важным значением этой технологии является то, что эксперименты на моделях без всяких проблем могут быть перенесены на изделия большого размера, благодаря чему могут быть устранены дорогие штамповочные эксперименты на готовых поковках для определения оптимальной геометрии заготовки и параметров штамповки.

Этот способ, который используют многие фирмы, дает возможность использовать для прецизионных поковок сплавы, которые ранее применяли только в качестве литейных сплавов.

Список литературы:

1. Meier R. *Gesenkschmieden mit erhöhter Maßgenauigkeit: Genauschnieden // Prazisionsschmieden. VDI-Z. 120. – 1978. – № 20. – S. 911 – 917.*
2. Altan T., Boulger F.W. u.a. *Forging Equipment, Materials and Practices. MCIC-HB-03. – National Inf. Service (NTIS). – 1973.*
3. Pam. CISA No. 3635068 / *Hot forming of titanium and titanium alloys // Watmough T., Schey J.A. – vom 18. – Jan. 1972.*
4. Schöder G., Winter K. *Superplastische Werkstoffe – ein Ueberblick // Ind. Anz. 92. – 1970. - № 20. - S. 425-430.*
5. Schelosky H. *Beitrag zum Verhalten superplastischer Werkstoffe beim Massivumformen // Bericht aus dem Institut f. Umformtechnik, TU Stuttgart. – 1976. – № 37. – Verlag W. Girardet, Essen.*
6. Scgubert F. *Superplastizität an pulvermetallurgisch hergestellten hochwarmfesten Nickellegierungen // Thyssen Techn. Berichte. 6. – 1974. – № 1. – S. 53 – 58.*