

УДК 621.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ КОЛЕЦ

Артем Игоревич Алимов

*Аспирант 1 года обучения,
кафедра «Технологии обработки давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: С.А. Евсюков,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии обработки
давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Одними из важнейших деталей в двигателестроении являются кольца газотурбинных двигателей (ГТД), служащие, в основном, соединительными элементами. Кольца ГТД являются особо ответственными деталями, т.к. выход хотя бы одного кольца из строя может привести к поломке всего двигателя, т.е. аварийной ситуации. Поэтому к кольцевым деталям авиационных ГТД, работающих в условиях высоких температур и динамических нагрузок, предъявляются высокие требования к структуре и уровню показателей механических свойств.

Наиболее распространенным материалом для изготовления колец ГТД является двухфазный титановый деформируемый сплав ВТ-6 (Ti-6Al-4V), который обладает высокими прочностными и жаропрочными свойствами, высокой коррозионной стойкостью и хорошей технологичностью.

Деталь «Кольцо» (рис. 1) используется для бандажирования сильфона ракетного двигателя РД-171, поэтому к ней предъявляются повышенные требования по механическим, структурным и физическим свойствам. Характер структуры сплава ВТ-6 формируется в процессе деформации и не поддается исправлению термической обработкой. В свою очередь, исходная структура определяет показатели механических свойств. Таким образом, оптимальная микроструктура деталей ракетного двигателя и, в частности, детали «Кольцо», является важным требованием.

Для устранения недостатков, присущих традиционному технологическому процессу получения крупногабаритных титановых колец методомковки на молотах, был предложен новый технологический процесс, состоящий из закрытой штамповки на КГШП, удаления перемычки и последующей горячей радиальной раскатки.

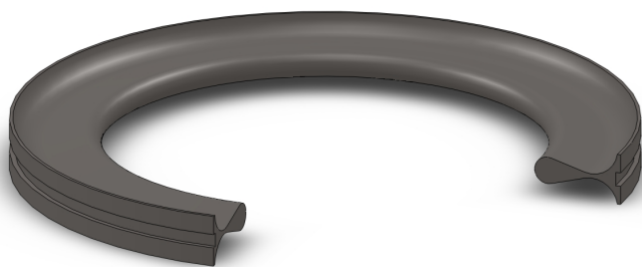


Рис. 1. 3D-модель детали
«Кольцо»

Описание базовой технологии изготовления детали «Кольцо»

Базовый технологический процесс изготовления детали «Кольцо» включает в себя следующие операции:

1. Нагрев мерных заготовок (пруток ВТ6 ГОСТ 26492-85) до температуры началаковки в камерной печи;
2. Осадка на молоте с МПЧ 3,15 т;
3. Прошивка отверстия на молоте с МПЧ 3,15 т;
4. Подогрев заготовки до температурыковки;
5. Раскатка на оправке кольцевой заготовки до конечного наружного диаметра на молоте с МПЧ 2 т. Если в процессе раскатки температура заготовки выходит из ковочного интервала, выполняют подогрев до температурыковки.

После раскатки поковка разрезается на ленточнопильном станке пополам и используется для изготовления двух деталей. Коэффициент использования металла в данном технологическом процессе составляет 11,9%.

Недостатками данной технологии являются:

- а. повышенные припуски на механическую обработку;
- б. высокие скорости деформации при ковке и раскатке на молоте, что приводит к снижению пластичности и получению неоднородной микроструктуры;
- в. неравномерность деформации, что приводит к нестабильности механических свойств;
- г. длительность обработки из-за большого количества ударов, что приводит к остыванию заготовки, снижению пластических свойств и получению неоднородной микроструктуры;
- д. необходимость последующего разрезания заготовки, что увеличивает время обработки, повышает расход металла (расход на стружку);
- е. технологический цикл осуществляется за 4 нагрева (нагрев перед ковкой, нагрев перед раскаткой и 2 подгрева в процессе раскатки), что повышает время обработки, снижает пластичность изделий за счет образования альфированного слоя и повышает затраты на оборудование и рабочих.

Для исследования существующего технологического процесса и создания нового использовался современный метод исследования с помощью метода конечных элементов.

Методика моделирования и принятые допущения

Моделирование проводилось в программном комплексе Deform 3D.

В качестве материала заготовки использовался материал Ti-6Al-4V из стандартной базы данных.

При моделировании принимались следующие допущения:

1. Заготовку и инструменты считаем сплошными, однородными и изотропными телами;
2. Модель деформируемого тела жестко-пластическая с нелинейным упрочнением;
3. Инструмент считаем жестким телом;

Начальный размер зерна задавался равным 15 мкм согласно ГОСТ 26492-85.

Исходная структура заготовок – ламеллярная.

Используемая математическая модель – глобуляризации титанового сплава ВТ6 по Джонсону-Мейлу-Аврами-Колмогорову.

Кинетика формирования глобулярной структуры:

$$X_{REX} = 1 - \exp \left[-\beta_d \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0.5}} \right)^{k_d} \right], \text{ где } \varepsilon_{0.5} = a_5 \dot{\varepsilon}^{m_5},$$

где $\varepsilon_{0.5}$ обозначает деформацию при 50% рекристаллизации.

Уравнение, определяющее средний размер глобулярного зерна:

$$d_{REX} = a_8 \varepsilon^{n_8} \dot{\varepsilon}^{m_8}, \text{ если } d_{DRX} > d_0, \text{ тогда } d_{DRX} = d_0.$$

Уравнение, определяющее средний размер зерна α -фазы:

$$d_{cp} = X_{DRX} d_{DRX} + (1 - X_{DRX}) d_0$$

Начало глобуляризации происходит при степени деформации $\varepsilon_c = 0,5$.

Использовались коэффициенты, которые были получены в работе [1].

Исследование технологического процессаковки на молоте и раскатки на оправке

Моделирование показало, что для осадки требуется 23 удара молота. Температурное поле после осадки представлено на рис. 2. Видно, что из-за большого количества ударов и продолжительного контакта нижнего бойка с заготовкой происходит значительное остывание нижней части поковки.

Это приводит к образованию зоны затрудненной деформации вблизи нижнего бойка. Это видно на рис. 3, на котором изображено распределение накопленной деформации после осадки.

Далее проводилось исследование наметки и прошивки. В качестве критерия разрушения использовался критерий Кокрофта-Лэзема. Следует отметить, что данный критерий разрушения определяется опытным путем, но, из-за отсутствия возможности проведения опыта, было принято решение принять его равным 0,45. Эта величина определяет поверхность, по которой происходит отделение перемычки и момент начала отделения перемычки, таким образом, влияя на предсказываемое усилие.

Моделирование показало, что для наметки на половину высоты поковки требуется 4 удара, для прошивки требуется 2 удара.

Распределение температуры после прошивки показано на рис. 4. Температура очень неоднородна по сечению и, кроме того, выходит за пределы интервала штамповки, поэтому перед раскаткой необходим промежуточный подогрев.

Температурное поле перед раскаткой на оправке представлено на рис. 5.

Раскатку на оправке применяют при ковке кольцеобразных поковок путем увеличения наружного и внутреннего диаметров прошивной заготовки за счет уменьшения толщины стенки (рис. 6).

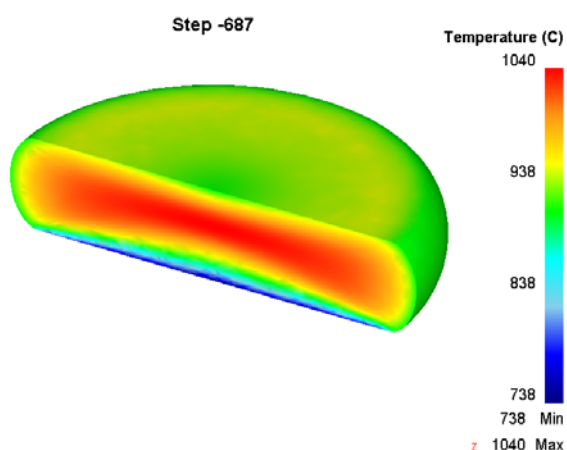


Рис. 2. Температурное поле после осадки

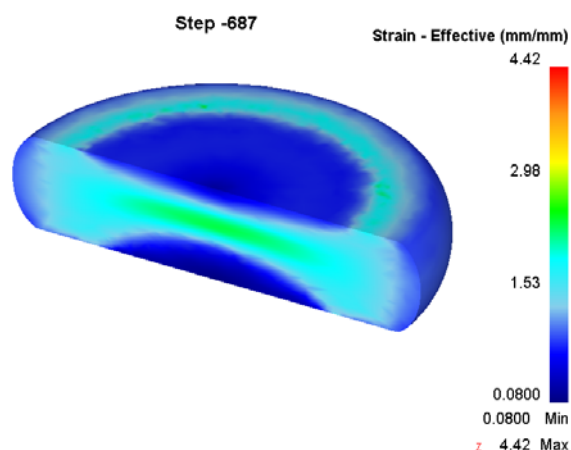


Рис. 3. Накопленные деформации после осадки

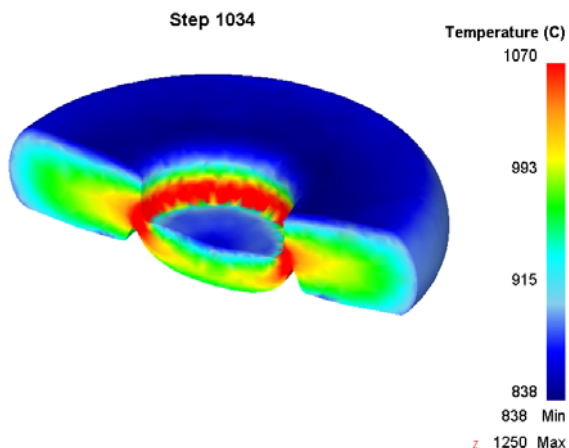


Рис. 4. Температурное поле после прошивки

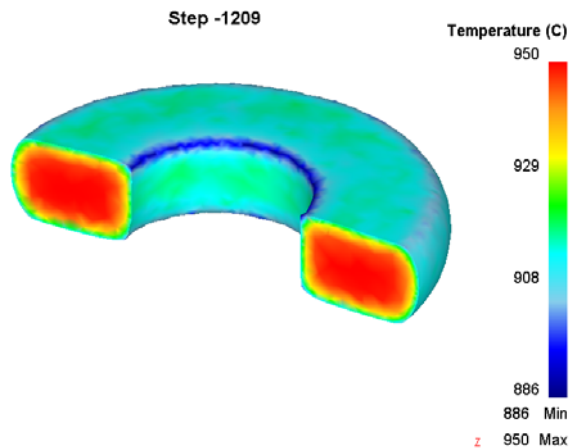


Рис. 5. Температурное поле перед раскаткой

Процесс является разновидностью протяжки, так как можно представить, что концы заготовки соединены между собой в кольцо. Ковку ведут узким верхним бойком 4, располагая его длинной стороной параллельно цилиндрической оправке 2, опирающейся на боек-скобу 1 или две стойки. При этом желательно, чтобы длина бойка перекрывала длину поковки 3 (высоту кольца).

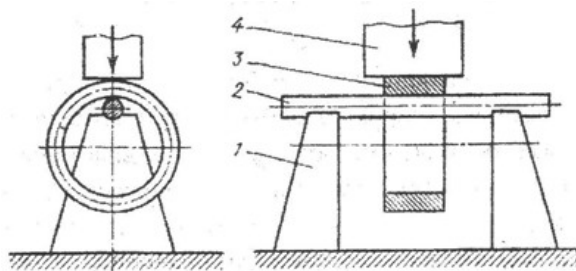


Рис. 6. Схема раскатки на оправке

После каждого обжатия оправку поворачивают, благодаря чему несколько поворачивается и кольцо. В результате раскатки наружный и внутренний диаметры кольца увеличиваются, а толщина стенки уменьшается. В ширину кольцо раздается незначительно.

Расчет показал, что для раскатки до требуемых размеров требуется 153 удара и 2 подогрева. Температурное поле после раскатки представлено на рис. 7.

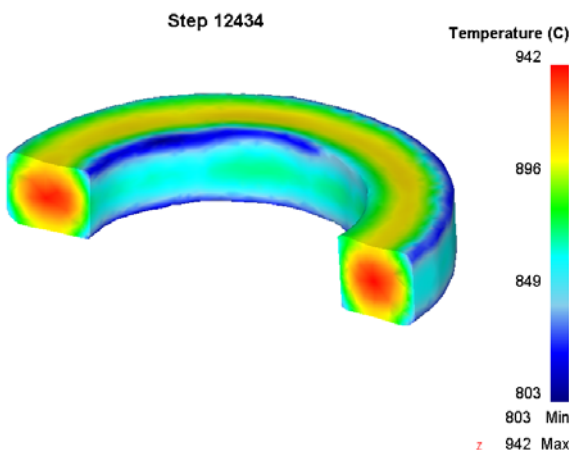


Рис. 7. Поле температур после раскатки

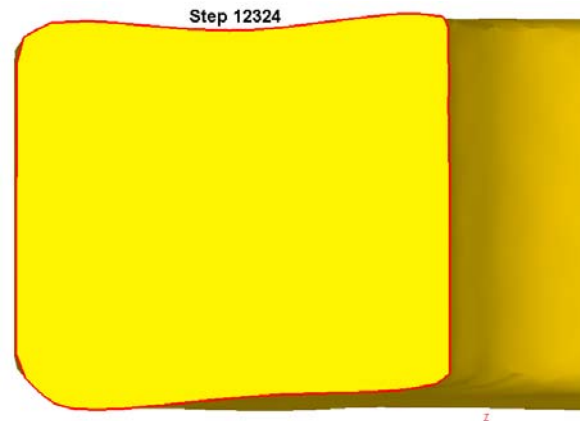


Рис. 8. Сечение кольца после раскатки на оправке

В процессе раскатки сечение кольцо искажается, а также образуется утяжина (рис. 8). Величина утяжины и искажение сечения кольца будет зависеть в большей степени от квалификации кузнеца.

Изменение доли глобулярных зерен в структуре по переходам представлено на рис. 9. Видно, что при осадке вследствие образования зоны затрудненной деформации вблизи нижнего бойка глобуляризация в этой зоне не происходит. Из-за высокой скорости деформации степень глобуляризации после операции осадки составляет всего лишь 0,406. Во время наметки и прошивки доля глобуляризованных зерен повышается до 0,541. В процессе раскатки доля глобулярных зерен в структуре поковки повышается до 0,655. Таким образом, не весь объем поковки глобуляризуется, что влечет за собой снижение механических свойств (в первую очередь пластичности).

Изменение среднего размера зерна α -фазы по переходам представлено на рис. 10.

Так как при осадке глобуляризация в зоне затрудненной деформации не происходит, то размер зерна α -фазы в процессе деформации не изменяется. Отчетливо видно уменьшение зерна в зоне интенсивного пластического течения (так называемого «ковочного креста»). После осадки средний размер зерна α -фазы составляет 7,64 мкм. В операциях наметки и прошивки средний размер зерна α -фазы меняется незначительно из-за низкой степени деформации, после прошивки он составляет 6,41 мкм. В процессе раскатки средний размер α -фазы уменьшается до 4,60 мкм. Имеется неоднородность микроструктуры: в отдельных зонах кольца средний размер α -фазы составляет 10...12 мкм.

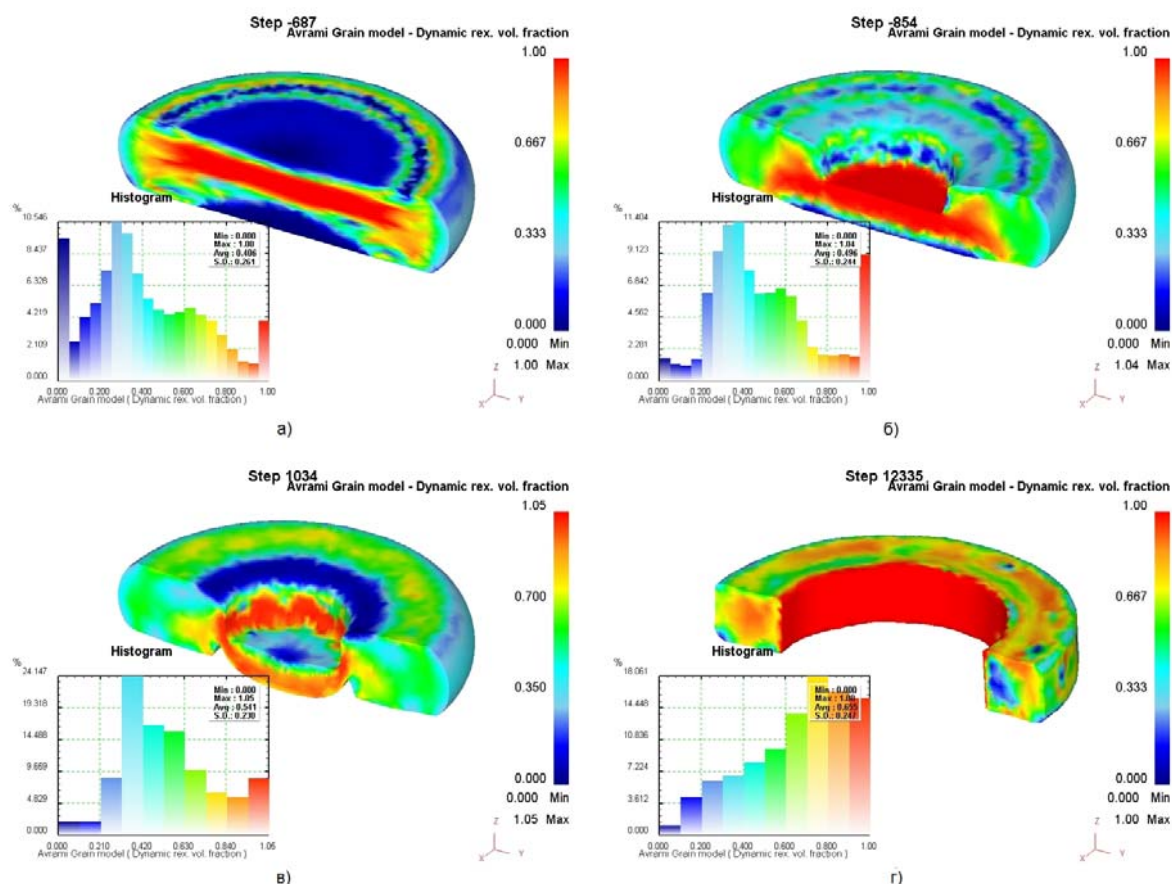


Рис. 9. Доля глобулярных зерен по сечению поковки:
а - после осадки; б - после наметки; в - после прошивки; г - после раскатки

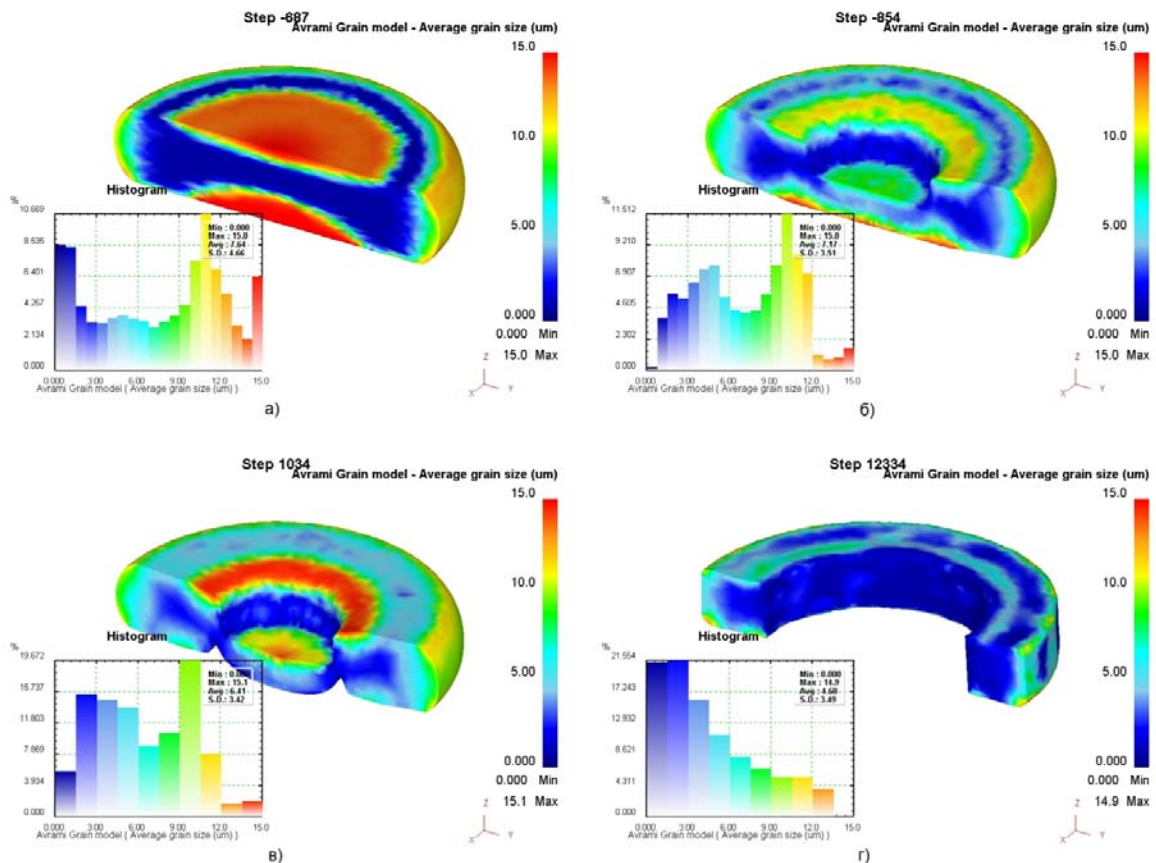


Рис. 10. Размер зерна α -фазы по сечению поковки:
а - после осадки; б - после наметки; в - после прошивки; г - после раскатки

Исследование технологического процесса штамповки на КГШП и раскатки на КРМ

После осадки температура поковки (рис. 11) не выходит за рамки допустимой, кроме того, она распределена более равномерно по сечению. Заметно некоторое охлаждение в тонком поверхностном слое, что не приведет к снижению свойств поковки.

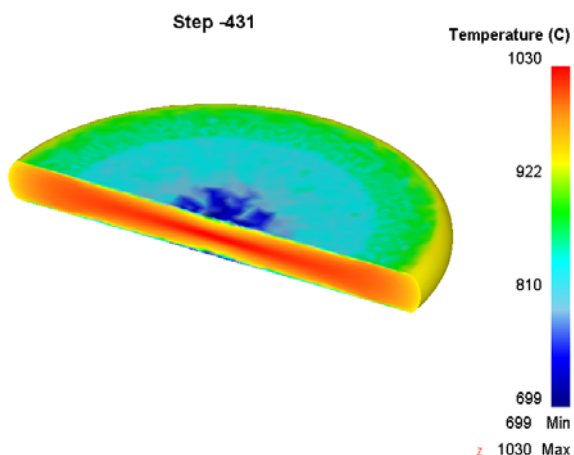


Рис. 11. Температурное поле после осадки

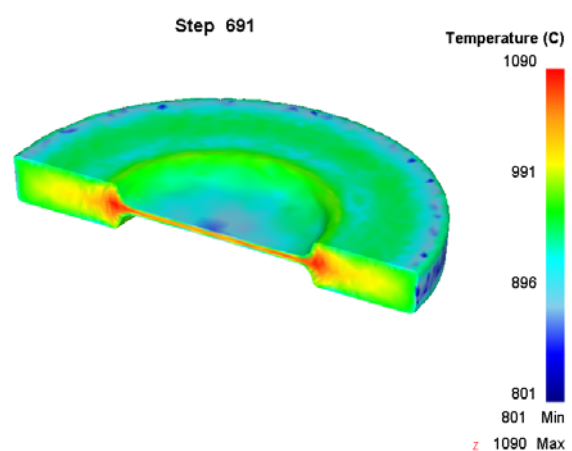


Рис. 12. Температурное поле после раскатки

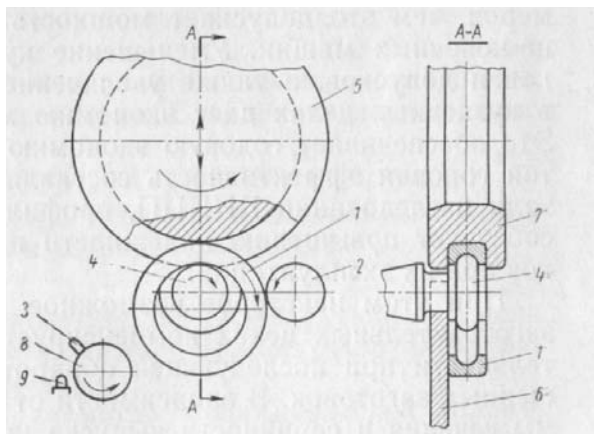


Рис. 12. Схема радиальной раскатки кольцевых заготовок:

1 - раскатываемая заготовка;
2 - опорный ролик; 3 - контрольный ролик;
4 - центральный раскатной валок; 5 - вращающийся нажимной валок;
6 - опорная планка;
7 - нажимной бандаж;
8 - отключатель; 9 - клапан

Для осадки до высоты 31,5 мм требуется усилие 13 МН, таким образом, КГШП 25 МН подходит для выполнения данной операции. Для закрытой штамповки требуется усилие 18,3 МН. Для прошивки требуется усилие 0,75 МН.

При закрытой штамповке позиционирование заготовки в матрице происходит по нижней плоскости и боковой поверхности поковки.

Температурное поле после закрытой штамповки показано на рис. 12. Температура поковки не выходит из интервала допустимой.

Далее проводилось моделирование горячей радиальной раскатки. Раскатка представляет собой технологическую операцию, посредством которой производится одновременное увеличение наружного диаметра и диаметра отверстия кольцевой поковки за счет уменьшения толщины ее стенки (рис. 13). При этом может быть изменена в желательном направлении также и форма поперечного сечения заготовки.

Т.к. очаг деформации локализован вблизи зоны контакта валков с заготовкой, то для снижения времени расчетов и повышения адекватности результатов разбиение сетки конечных элементов проводилось с заданием окна плотности в очаге деформации.

Температурное поле после раскатки показано на рис. 15. Температура в поковке после раскатки не выходит за пределы интервала штамповки для сплава ВТ6, температура несколько ниже допустимой оказывается только в тонком заусенце, который будет удален при механической обработке и это не повлияет на механические свойства конечной детали.

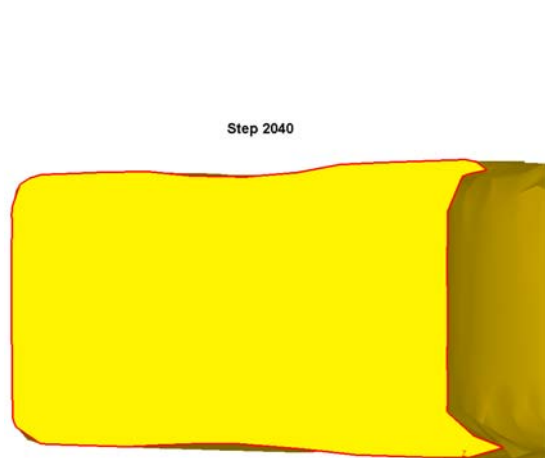


Рис. 13. Сечение кольца после раскатки

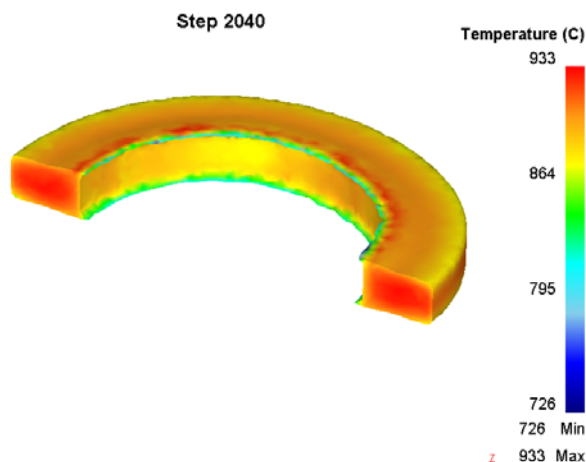


Рис. 14. Поле температур после раскатки

Для раскатки требуется усилие 185 кН, то есть усилия кольцераскатного автомата в 300 кН достаточно для выполнения данной операции.

В процессе раскатки образуется утяжина (рис. 14), но она не выходит за пределы допуска по высоте поковки. Также образуется заусенец на внутренней цилиндрической поверхности кольца. Этого можно избежать, если использовать закрытый калибр. Форма получаемого сечения кольца предсказуема и не зависит от квалификации кузнеца, так как процесс раскатки происходит автоматически.

Изменение доли глобулярных зерен в структуре по переходам представлено на рис. 16.

При осадке на КГШП вследствие высокой степени деформации ($\sim 0,81$) и умеренной скорости деформации глобуляризация проходит почти полностью, после осадки доля глобулярных зерен по сечению составляет 0,736. Однако на торцах кольца из-за трения и, вследствие этого, затрудненного течения, имеются зоны, не полностью глобуляризовавшиеся. Кроме того, боковая поверхность кольца также глобуляризуется не полностью. В процессе закрытой штамповки зоны затрудненной деформации получают достаточную деформацию для того, чтобы структура полностью превратилась из ламеллярной в глобулярную. В процессе раскатки на кольцераскатной машине боковая поверхность кольца достаточно прорабатывается.

После раскатки доля глобулярных зерен составляет 0,948. Таким образом, в процессе данного технологического процесса глобуляризуется практически весь объем поковки, что повышает механические свойства (в частности, пластичность). Кроме того, высокая степень деформации снижает анизотропию сплава ВТ6.

Изменение среднего размера зерна α -фазы по переходам представлено на рис. 17.

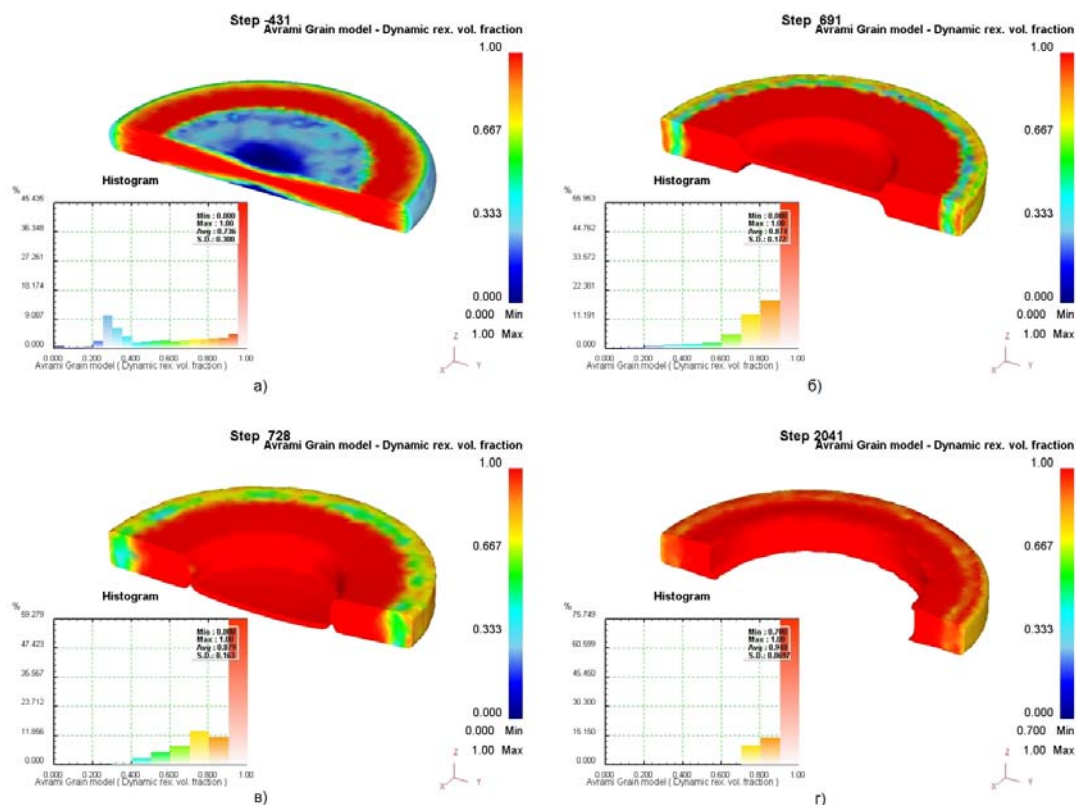


Рис. 15. Доля глобулярных зерен по сечению поковки:

а - после осадки; б - после закрытой штамповки; в - после прошивки; г - после раскатки

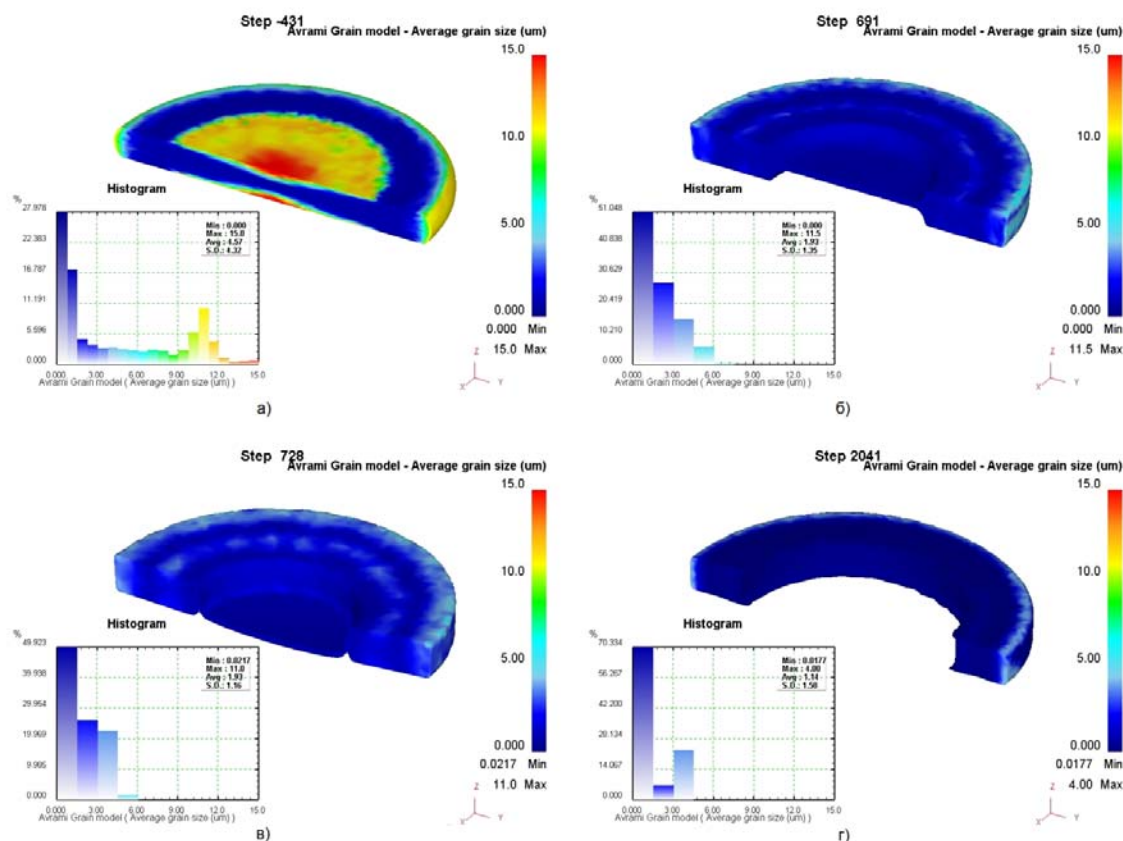


Рис. 16. Размер зерна α -фазы по сечению поковки:
а - после осадки; б - после закрытой штамповки; в - после прошивки; г - после раскатки

Наиболее интенсивное уменьшение среднего размера зерна α -фазы происходит в процессе осадки на КГШП (до 4,57 мкм) и закрытой штамповки на КГШП (до 1,93 мкм). После раскатки на кольцераскатной машине образуется мелкозернистая однородная структура со средним размером зерна α -фазы 1,14 мкм.

Наиболее полно (см. рис. 17) происходит в технологических операциях, в процессе которых поковка получает наибольшую деформацию, в данном случае, осадке и закрытой штамповке. При высоких скоростях деформирования титановые сплавы имеют низкую пластичность. При скоростях деформирования, характерных для КГШП и ниже, многие титановые сплавы имеют хорошую пластичность и позволяют деформировать их со степенью деформации до 0,9.

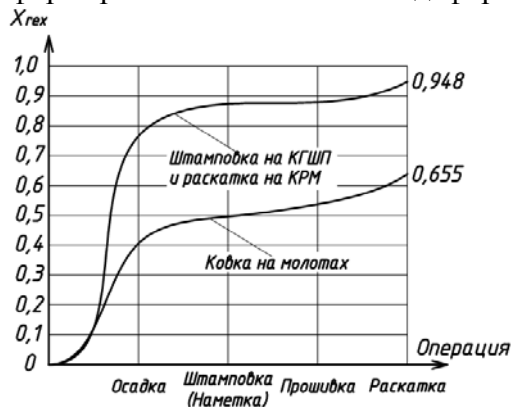


Рис. 17. Сравнительный график изменения объемной доли глобулярной структуры

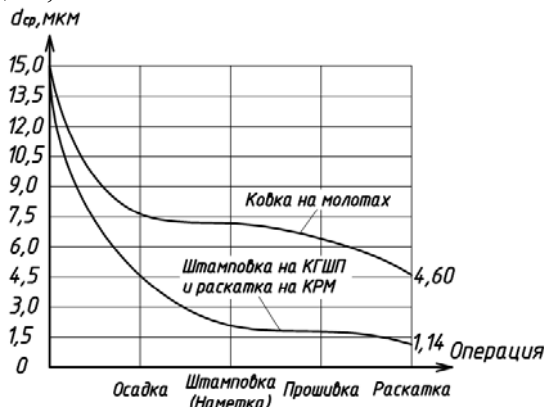


Рис. 18. Сравнительный график изменения среднего размера зерна α -фазы

Из рис. 18 видно, что после штамповки на КГШП и раскатке на КРМ получается мелкозернистая однородная микроструктура, которая способствует повышению пластичности, ударной вязкости, прочности.

К сожалению, в данное время не существует математических моделей динамической, статической и метадинамической рекристаллизации многих сплавов, в том числе титановых, а также стандартных методик для их получения. Кроме того, кривые упрочнения многих сплавов содержат узкий диапазон температур, степеней деформации и скоростей деформации и получаются авторами по разным методикам. Это не позволяет проводить комплексные исследования технологических процессов с целью повышения качества и долговечности получаемых поковок и разрабатывать процессы получения новых деталей.

Выводы

1. Технологический процессковки на молоте и раскатки на оправке осуществляется за 182 удара.
2. При осадке на молоте происходит значительное остывание нижней части поковки, что приводит к увеличению застойной зоны и неравномерности деформации.
3. Большое количество нагревов при ковке на молотах приводит к увеличению альфированного слоя и снижению пластичности.
4. Высокая скорость деформации при ковке на молотах приводит к снижению пластичности.
5. Процесс закрытой штамповки на КГШП и раскатки на КРМ можно осуществлять за один нагрев.
6. В процессе раскатки на КРМ образуется незначительная утяжина.
7. В процессе раскатки на КРМ образуется заусенец, который может привести к трудностям при дальнейшей механической обработке.
8. Форма получаемого сечения кольца после раскатки на КРМ предсказуема и не зависит от квалификации кузнеца, так как процесс раскатки происходит автоматически.
9. Высокая степень деформации при закрытой штамповке на КГШП и раскатке на КРМ снижает анизотропию материала и повышает механические свойства.
10. При раскатке на оправке происходит искажение сечения кольца, которое зависит в большей степени от квалификации кузнеца.
11. Штамповка на КГШП с последующей раскаткой обеспечивает мелкозернистую однородную микроструктуру, объемная доля глобулярной структуры после обработки равна 0,948, что обеспечивает высокие механические свойства.
12. В процессековки и раскатки на молотах глобуляризация не проходит полностью, кроме того, образуется неоднородная микроструктура.

Литература

1. *N. V. Lopatin, O. N. Maradudina, and G. S. D'yakonov.* "Analysis of the Structure Formation and Properties of the VT6 Alloy during Upsetting of the Symmetrically Truncated Conical Billets", Russian Journal of Non Ferrous Metals, 2011, Vol. 52, No. 1, 33–38.
2. *Чечулин Б.Б., Ушаков С.С.* Титановые сплавы в машиностроении, Л., «Машиностроение» (Ленингр. отделение), 1977. – 248с.
3. *А. И. Спришевский* Подшипники качения. - М.: Машиностроение, 1968. – 632 с
4. *Сторожев М.В.* (ред.) Ковка и объемная штамповка стали. Справочник в 2-х томах, том. 2, М., «Машиностроение», 1967. – 448с.
5. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х т. – Т.2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И.Семенова / - М.: Машиностроение, – 1986, 592с.