

**OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY OF A CHARACTERISTIC SECTION
OF A COMPLEX-PROFILE THIN-WALLED BLANK OF THE ORIGINAL
GEOMETRY BY MODELING AND FINITE ELEMENT ANALYSIS METHODS**

*Nikolai Yurievich Stepanenko, Sergey Vladimirovich Chertovskikh ^a,
Vasily Vasilyevich Lukyanov*

Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov st., 450064 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

^a chertovskikh@mail.ru

ABSTRACT

The use of superplastic forming (SPF) technology has a wide range of applications: from complex-profile body parts to multilayer spatial structures manufactured in one molding step. One of the main disadvantages of SPF is the uneven thickness of the parts obtained due to the large elongation of the material, often complicated by the design of the part. The solution to this problem is the use of modeling, which allows you to perform calculations, identify characteristic defects and optimize the workpiece in order to obtain a part with the required geometry. The paper considers issues related to the modeling of the manufacture of parts by diffusion welding (DW) with subsequent SPF and finite element analysis of the “isothermal bending” operation and subsequent SPF of the inlet protective edge of a composite gas turbine engine blade made of VT6 titanium alloy (6Al-4V Grade5). The MSC Marc software package was selected as the software package for modeling. Modeling and finite element analysis of the technological processes of isothermal bending (twisting), diffusion welding and superplastic forming of the inlet protective edge of a composite blade were performed. On the basis of the results of modeling and finite element analysis, in order to prevent violation of the internal geometry of the part in the form of rough deformation of the technological radius, it was proposed to use a round constant cross-section wire with a diameter of 3.1 mm made of stainless steel with an anti-diffusion coating applied to it. The optimal geometry of the internal cavity of the blank package and the parameters of the inserted wire were selected.

KEYWORDS

Modeling; finite element analysis; isothermal bending; diffusion welding; superplastic forming; titanium alloy VT6.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ХАРАКТЕРНОГО СЕЧЕНИЯ
СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ЗАГОТОВКИ
ИСХОДНОЙ ГЕОМЕТРИИ МЕТОДАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

*Николай Юрьевич Степаненко, Сергей Владимирович Чертовских ^a,
Василий Васильевич Лукьянов*

АННОТАЦИЯ

Применение технологии сверхпластической формовки (СПФ) имеет широкий круг применения: от сложнопрофильных корпусных деталей до многослойных пространственных структур, изготавливаемых за один формовочный переход. Одним из основных недостатков СПФ является разнотолщинность получаемых деталей ввиду большой вытяжки материала, зачастую усложненную конструктивным исполнением детали. Решением данной задачи является применение моделирования, позволяющего провести расчет, выявить характерные дефекты и оптимизировать заготовку с целью получения детали требуемой геометрии. В работе рассмотрены вопросы, связанные с моделированием изготовления деталей методом диффузионной сварки (ДС) с последующей СПФ и проведением конечно-элементного анализа операции «изотермическая гибка» и последующей СПФ входной защитной кромки композитной лопатки газотурбинного двигателя, изготовленной из титанового сплава ВТ6. В качестве программного комплекса для моделирования выбран программный пакет MSC Marc. Произведены моделирование и конечно-элементный анализ технологических процессов изотермической гибки (крутки), ДС и СПФ входной защитной кромки композитной лопатки. По результатам моделирования и конечно-элементного анализа для предотвращения нарушения внутренней геометрии детали в виде грубого деформирования технологического радиуса предложено использование проволоки круглого постоянного сечения диаметром 3,1 мм из нержавеющей стали с нанесенным на нее антидиффузионным покрытием. Подобраны оптимальная геометрия внутренней полости пакета заготовок и параметры вкладываемой проволоки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Моделирование; конечно-элементный анализ; изотермическая гибка; диффузионная сварка; сверхпластическая формовка; титановый сплав ВТ6.

Введение

Перспективы развития машиностроительной отрасли накладывают ряд требований на механические свойства, эксплуатационные характеристики, а также актуальность применяемых методов при изготовлении деталей. Традиционные методы уходят на второй план ввиду сложности конструкции изделий и большого количества переходов необходимых для достижения заданной геометрии.

Для получения сложнопрофильных крупногабаритных деталей тонкостенной кон-

струкции целесообразно применение явления сверхпластичности металлов.

Сверхпластичностью принято называть способность поликристаллических материалов, которые при определенной температурно-скоростной характеристике способны испытывать многократные пластические деформации при низких напряжениях течения [1–3]. Оптимальные значения параметров деформирования позволяют получить наибольшую «вытяжку» материала без образования характерного локального утончения, предшествующего разрыву образца (рис. 1).

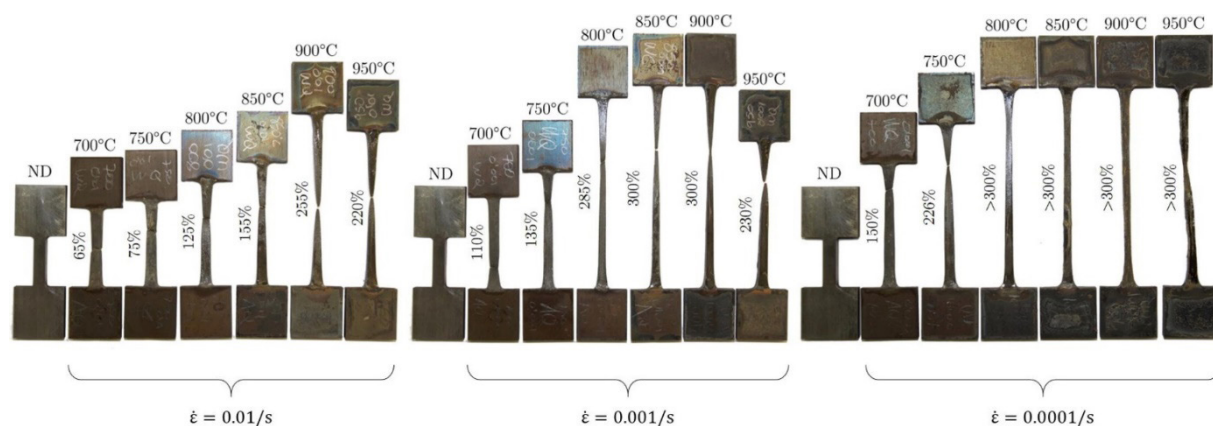


Рис. 1. Образцы из титанового сплава ВТ6 при испытаниях на растяжение с разной температурой и скоростью деформации [4]

Fig. 1. Samples of titanium alloy VT6 during tensile testing at different temperatures and strain rates [4]

Сверхпластичность – это уникальное физическое явление, при котором материалы демонстрируют экстраординарную способность к деформации без признаков разрушения даже при экстремальных уровнях растяжения или сжатия. Это свойство, наблюдаемое как в металлических сплавах, так и в керамических материалах, имеет фундаментальное значение для современных технологий, позволяя создавать сложные инженерные конструкции, которые ранее считались недостижимыми. Механизмы, лежащие в основе сверхпластичности, представляют собой сложное взаимодействие микроструктурных, термических и кинетических факторов, каждый из которых вносит вклад в формирование необычных деформационных характеристик.

Ключевым фактором, определяющим степень сверхпластичности, является микроструктура материала, в частности размер зерен. Мелкозернистые материалы, где средний размер зерен не превышает нескольких микрон, демонстрируют повышенную способность к равномерной деформации. Это связано с тем, что уменьшение размера зерен увеличивает долю границ между ними, которые действуют как барьеры для движения дислокаций – линейных дефектов кристаллической решетки. В результате пластическая деформация происходит не за счет

дислокационного скольжения, как в классических случаях, а через механизмы зернограничного скольжения и диффузионного переноса атомов [2, 5, 6].

Для обычных, не сверхпластичных, материалов известно, что чем мельче зерно, тем выше предел текучести и прочность металла. Одновременно при измельчении зерна снижается пластичность металла, в то время как вязкость может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от типа материала и условий. Последнее особенно важно для металлических изделий, работающих при повышенных температурах. Повышенная пластичность и вязкость обусловлены более однородным составом и строением мелкозернистого металла, отсутствием в нем крупных скоплений структурных несовершенств, способствующих образованию трещин. Величина предела текучести σ_T связана с размером зерна d известным эмпирическим соотношением, которое называют уравнением Холла-Петча [5, 6]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2},$$

где σ_0 и k – постоянные для данного материала.

В области малых значений среднего диаметра зерна зависимость предела текучести от размера зерна меняется на обратную и наблюдается снижение σ_T с уменьшением d .

Это обстоятельство имеет большое значение в процессах СПФ листовых материалов при относительно низких скоростях деформации. В этом случае увеличение среднего размера зерен в ходе деформации приводит к упрочнению материала, ухудшению сверхпластических свойств, что, в свою очередь, иногда может быть причиной выхода материала из состояния сверхпластичности и развития локализации деформации.

Температурные условия играют не менее важную роль, являясь причиной активации диффузионных процессов. При повышенных температурах, часто достигающих 0,5–0,7 от температуры плавления материала, атомы приобретают повышенную подвижность, что облегчает релаксацию напряжений и перераспределение дефектов структуры. Однако существует тонкий баланс: чрезмерный нагрев может привести к росту зерен (рекристаллизации), что разрушает мелкозернистую структуру и снижает сверхпластичность. Поэтому выбор оптимального температурного режима требует учета как термодинамических свойств материала, так и кинетики зернограничной диффузии, что особенно критично для многокомпонентных сплавов [7].

Скорость деформации выступает третьим столпом, определяющим проявление сверхпластичности. Низкие скорости деформации (порядка 10^{-5} – 10^{-3} с⁻¹) позволяют материалу адаптироваться к приложенным нагрузкам за счет активации вязкостных механизмов. При этом формируется квазиравновесное состояние, при котором напряжение течения остается практически постоянным, а деформация может достигать сотен процентов. Высокие скорости, напротив, провоцируют локализацию деформации, образование микропор и преждевременное разрушение [5].

На сверхпластичность материалов также может существенно влиять добавление в сплавы легирующих элементов. Некоторые элементы могут увеличивать сверхпластичность за счет образования мелкозернистой структуры или изменения свойств границ

зерен. Другие элементы могут уменьшать сверхпластичность из-за образования крупных зерен или изменения микроструктуры. Например, в титановых сплавах легирование ванадием или молибденом стабилизирует β -фазу, обеспечивая сверхпластичность при относительно низких температурах [8].

Сверхпластическая деформация может происходить по различным механизмам, включая зернограничное скольжение, диффузионное течение и дислокационное скольжение. Понимание этих механизмов важно для разработки методов управления сверхпластичностью [2, 9–11].

СПФ является одним из наиболее эффективных методов обработки материалов, позволяющим получать сложные детали с высокой точностью и минимальными отходами. Благодаря своим преимуществам СПФ находит широкое применение в аэрокосмической, автомобильной и других высокотехнологичных отраслях промышленности, где требуется изготовление деталей сложной геометрии с высокими эксплуатационными характеристиками.

Основными критериями при изготовлении сложнопрофильных деталей методом СПФ является необходимость ультрамелкозернистой структуры заготовок [12–15], а также специализированного комплекса оборудования, позволяющего обеспечить режим подачи формующего газа, а также температурное поле для разогрева заготовок до состояния сверхпластичности. Данные критерии накладывают трудность на широкое распространение рассматриваемого метода [1–5].

Актуальность изучения математического моделирования процесса СПФ обусловлена необходимостью повышения эффективности и точности технологических процессов, а также снижения затрат на экспериментальные исследования. Математическое моделирование позволяет прогнозировать поведение материала, оптимизировать параметры формовки и минимизировать риск возникновения дефектов [16–20]. Однако, несмотря

на значительный прогресс в этой области, остаются нерешенные проблемы, связанные с учетом нелинейных эффектов, микроструктурных изменений и сложных граничных условий [21, 22].

Важным направлением в развитии машиностроения является также возможность снижения массы при сохранении эксплуатационных характеристик изделия. Одним из перспективных путей решения данной задачи стала замена деталей, традиционно изготавливаемых из металла, деталями из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Детали, изготовленные из некоторых видов пластиков, имеют удельную жесткость выше, чем аналогичные детали, изготовленные из металла. Изделия из ПКМ имеют повышенную стойкость к воздействию кислот, щелочей, масел и морской воды; высокую радиопрозрачность; улучшенные тепло- и электроизоляционные характеристики; обладают повышенной вибростойкостью и повышенными демпфирующими свойствами; характеризуются отсутствием чувствительности к магнитному полю. Применение ПКМ активно внедряется в большинство отраслей машиностроения: они используются в изготовлении винтов, лопастей, корпусов лодок, сосудов и труб для химических веществ, спортивного инвентаря, медицинских изделий, а также корпусных изделий и лопаток авиационных двигателей. Из-за малой эрозионной стойкости и сдвиговой прочности связующего композиционных материалов ухудшается их ударная прочность [23, 24], что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках. Решением данной проблемы по применению полимерных композиционных материалов, например, в качестве лопатки газотурбинного двигателя является возможность применения титановой защитной кромки, защищающей торцевые части изделий, подверженных набегающему потоку воздуха [25, 26].

Таким образом, целью данной работы является моделирование (с проведением конечно-элементного анализа) перспективно-

го технологического процесса изготовления входной титановой защитной кромки для композитной лопатки газотурбинного двигателя, а именно: операции «изотермическая гибка», ДС и последующая СПФ входной защитной кромки для выявления характерных дефектов и оптимизации заготовки с целью получения детали требуемой геометрии.

1. Методика исследований

Существует технология изготовления входной защитной кромки для полимерных композитных лопаток с использованием диффузионной сварки и последующей СПФ. Технологический процесс включает в себя фрезеровку половин заготовок, нанесение антидиффузионного покрытия, сборку пакета, состоящего из половин заготовок, обварку пакета по контуру аргонодуговой сваркой, ДС, изотермическую гибку (крутку) и СПФ с последующей калибровкой.

Особенностью данной технологии является формирование характерного заострения во внутренней полости кромки, что может привести к возникновению концентраторов напряжений. Для предотвращения появления данного дефекта предложен метод, который предполагает предварительную фрезеровку внутреннего радиуса на заготовках. Для недопущения существенного деформирования заготовок во время проведения операции ДС по внутреннему радиусу во внутренней полости заготовки, предполагается нанесение антидиффузионного покрытия и укладка стальной проволоки. После операции ДС, крутки профиля и СПФ, на этапе вырезки заготовок предполагается извлекать проволоку.

Моделирование и анализ методом конечных элементов технологического процесса изготовления входной защитной кромки из титанового сплава ВТ6 композитной лопатки вентилятора газотурбинного двигателя проводились при помощи программного комплекса MSC Marc для характерного сечения, находящегося на расстоянии 120 мм от торца заготовки втулочной части (рис. 2).

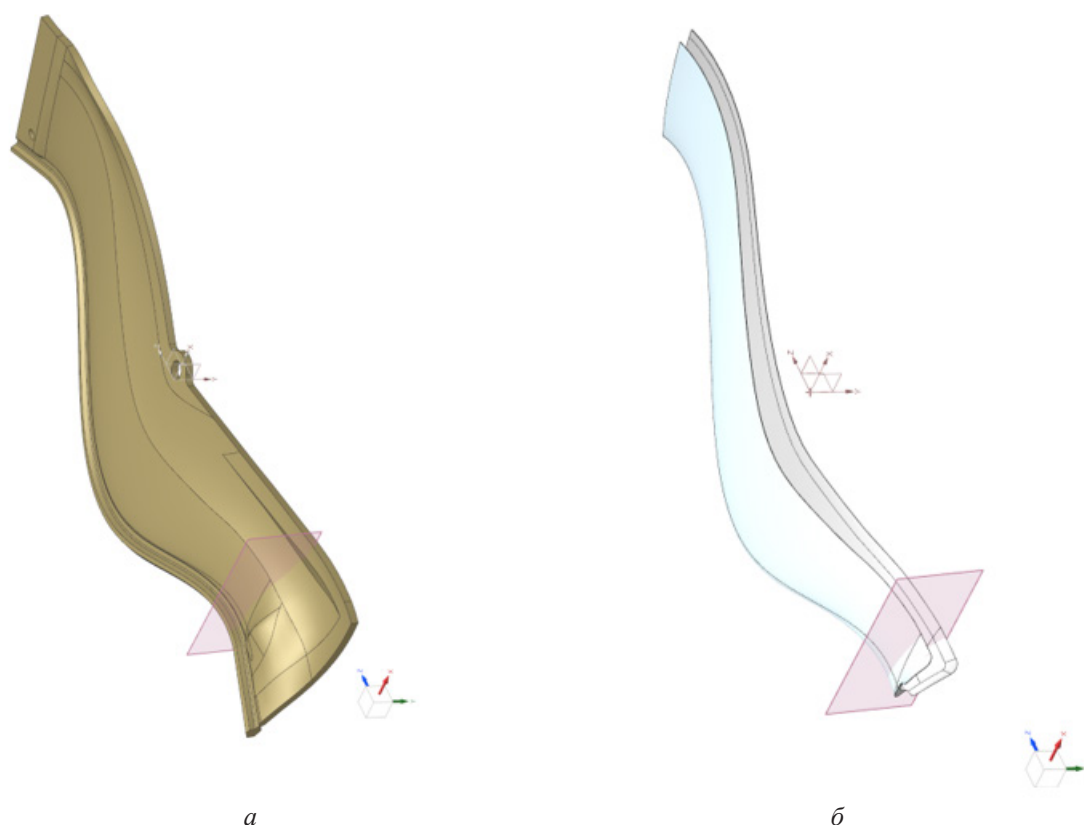


Рис. 2. Характерное сечение заготовки на расстоянии 120 мм от ее торца:
а – вид заготовки; б – вид готовой кромки

Fig. 2. Typical cross-section of the workpiece at a distance of 120 mm from its end:
а – view of the workpiece; б – view of the finished edge

2. Результаты и их обсуждение

Для решения поставленной задачи получения корректной геометрии внутреннего профиля детали моделирование было поделено на два этапа: расчет с применением исходной геометрии для локализации и отслеживания формирования дефекта и расчет с использованием в качестве математической модели сечения оптимизированной геометрии. Оба этапа моделирования были поделены на этапы характерные для формирования детали согласно технологическому процессу. Для оценки параметров деформирования заготовок (вытяжки материала) на всех этапах оцениваются максимальные перемещения (смещения элементов относительно исходного положения). Также оценивается значение максимальных напряжений по Мизесу

для локализации опасных зон в критическом сечении.

На первом этапе производился расчет с применением исходной геометрии, моделирование поделено на подэтапы, характерные для данной геометрии: изотермическая гибка (крутка) и подэтап СПФ. Этап ДС не выполнялся ввиду отсутствия его влияния на изменение геометрии, так как внутренний профиль в исходном состоянии является плоским для обеих половин пакета заготовки.

На этапе изотермической гибки конечно-элементная сетка состояла из 38217 трехгранных элементов с размером стороны 0,2 мм.

Граничными условиями на подэтапе изотермической гибки являлись преднагрев сложнопрофильной детали до температуры 900 °С и условие «смыкания» штампа (рис. 3).

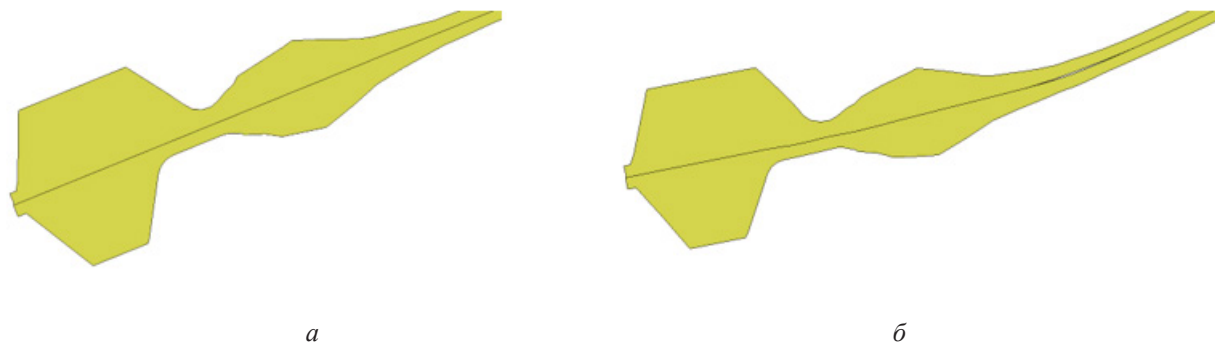


Рис. 3. Сечение заготовки на расстоянии 120 мм от торца:
a – вид исходной заготовки; *б* – вид после операции «изотермическая крутка»

Fig. 3. Section of the workpiece at a distance of 120 mm from the end:
a – view of the original workpiece; *б* – view after the “isothermal twisting” operation

Максимум эквивалентных напряжений по Мизесу составил 281 МПа и располагался в области входной кромки (рис. 4). Максимальные значения пластических деформаций (перемещений) при этом не превышали

0,2 мм (рис. 5). Данные значения укладываются в допуск согласно технологическому процессу на данные операции для данного типа деталей.

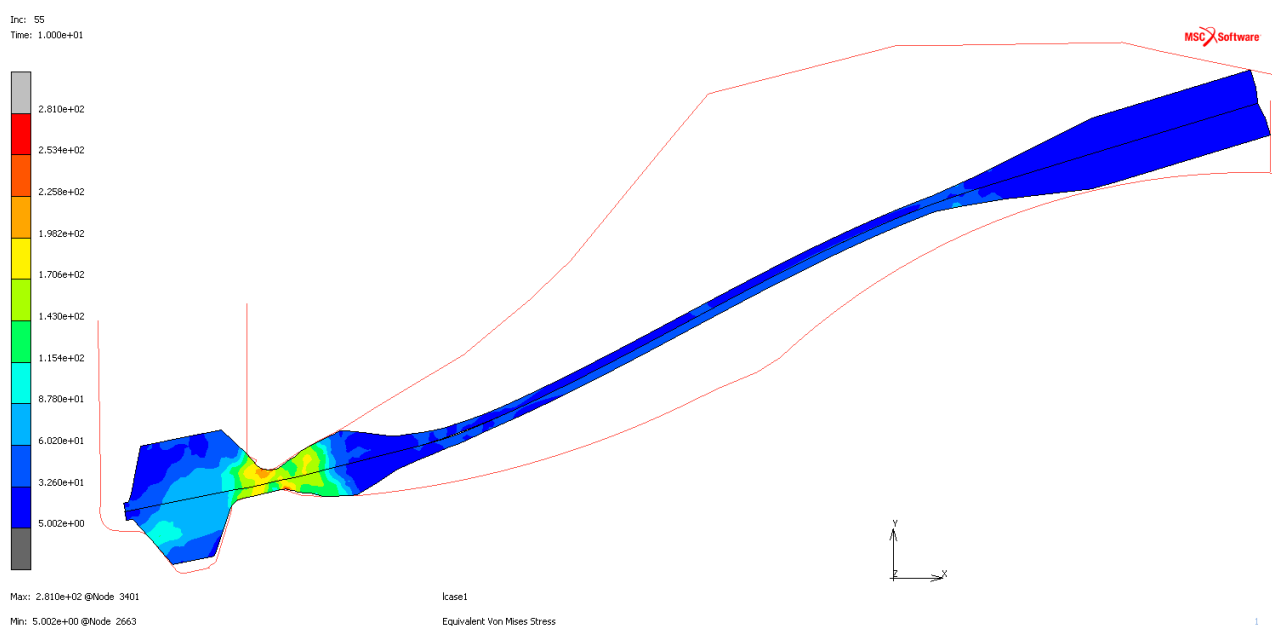
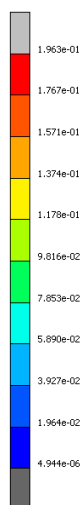


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по Мизесу

Fig. 4. Equivalent stresses according to von Mises

Inc: 55
Time: 1.000e+01



Max: 1.963e-01 @Node 3401
Min: 4.944e-06 @Node 3517

Icase1
Maximum Principal Value of Plastic Strain

MSC Software



Рис. 5. Максимальные значения пластических деформаций (перемещений)

Fig. 5. Maximum values of plastic deformations (displacements)

На втором подэтапе производилось моделирование операции СПФ заготовки исходной конструкции, расчет проводился с учетом свойств сверхпластичности для титанового сплава ВТ6 (рис. 6.). Параметры конечно-элементной сетки: 38777 трехгранных элементов с размером стороны 0,2 мм.

Максимум эквивалентных напряжений по Мизесу составил 9,35 Мпа и локализовался в области входной кромки (рис. 7). Мак-

симальные значения пластических деформаций (перемещений) при этом не превышали 0,85 мм (рис. 8). Проанализировав распределение напряжений и пластических деформаций, можно сделать вывод, что в детали отсутствуют выраженные локальные напряжения, а растяжение материала в поперечном сечении заготовки происходит равномерно, без образования характерных локальных утонений.

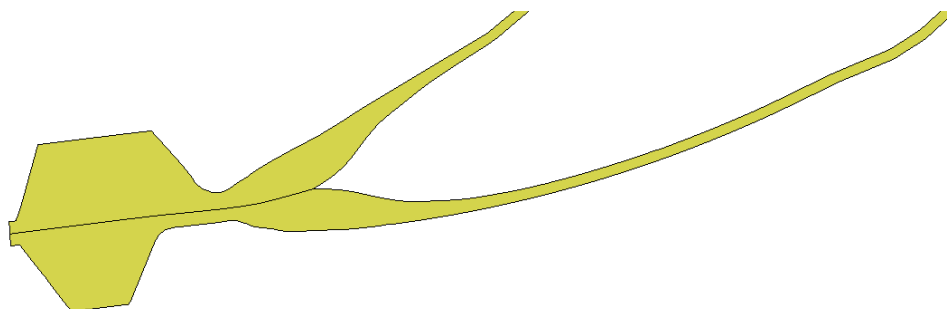


Рис. 6. Сечение заготовки на расстоянии 120 мм от торца:
вид после операции СПФ

Fig. 6. Section of the workpiece at a distance of 120 mm from the end:
view after the SPF operation

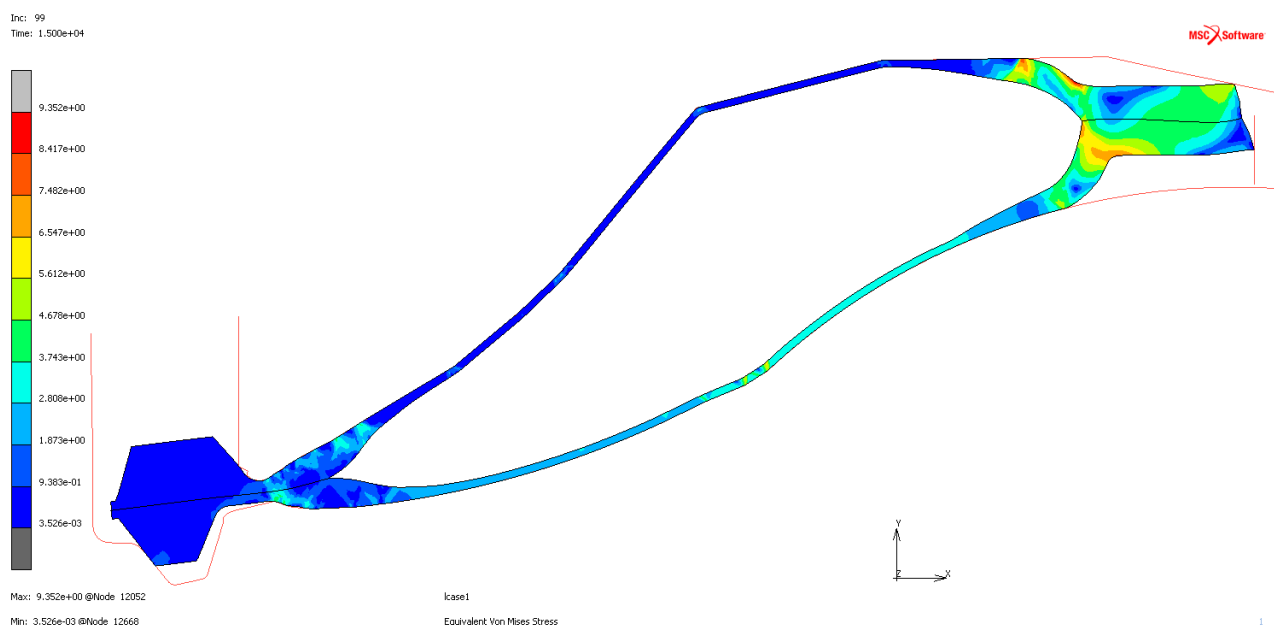


Рис. 7. Эквивалентные напряжения по Мизесу

Fig. 7. Equivalent stresses according to von Mises

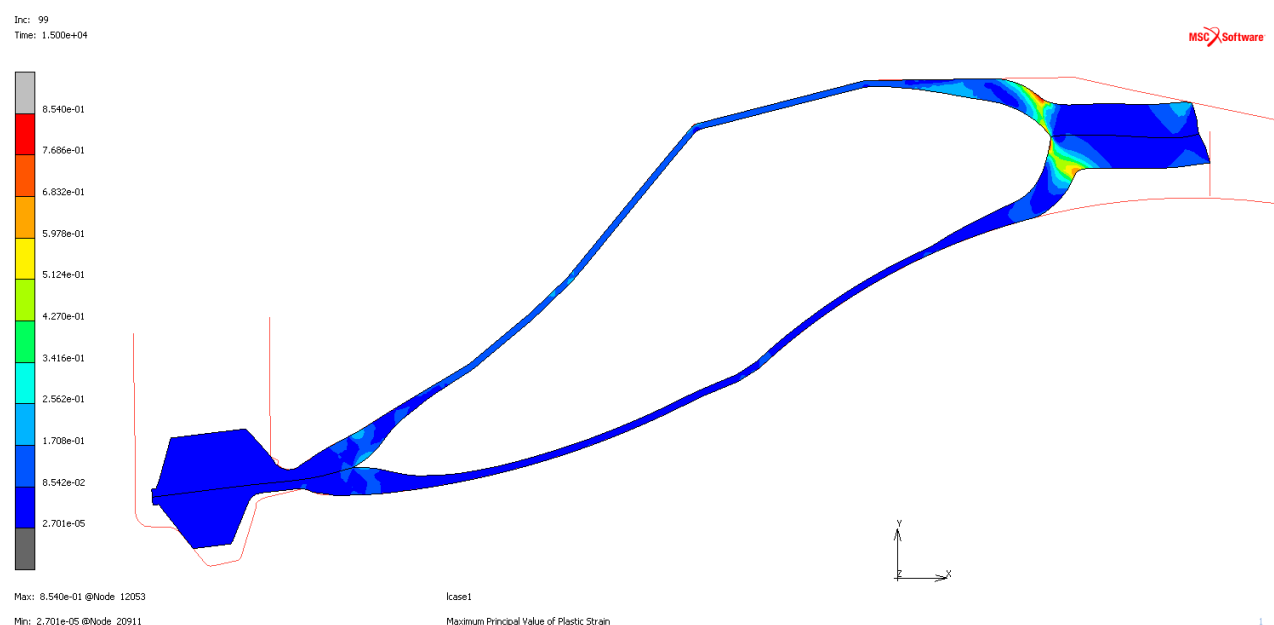


Рис. 8. Максимальные значения пластических деформаций (перемещений)

Fig. 8. Maximum values of plastic deformations (displacements)

По результатам первого этапа расчета с применением модели исходной геометрии технологических процессов изотермической гибки (крутки) и СПФ выявлено, что внутренний радиус входной кромки имеет геометрию отличную от заданной, и следовательно, требует механической обработки. Для устранения данного дефекта предложен

метод с предварительной фрезеровкой технологического радиуса.

На втором этапе выполнялся расчет с использованием в качестве математической модели сечения оптимизированной геометрии. На первом подэтапе производился расчет технологической операции ДС, при этом расчет операции изотермической гибки пропущен

ввиду отсутствия его влияния на внутренний профиль заготовки. Для предотвращения грубого деформирования технологического радиуса в него «вкладывалась проволока» круглого постоянного сечения диаметром 3,1 мм из нержавеющей стали с нанесенным на нее антидиффузионным покрытием, принятая условно за недеформируемый объект на данном и последующих подэтапах расчета (рис. 9). Результат моделирования приведен на рис. 10 и 11.

На этапе диффузионной сварки конечно-элементная сетка состояла из 20474 трехгранных элементов с размером стороны 0,25 мм.

Максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу составило 4,92 МПа (рис. 10), а максимальное значение пластических деформаций (перемещений) составило 0,2 мм (рис. 11).

На втором подэтапе произведен расчет операции СПФ (рис. 12).

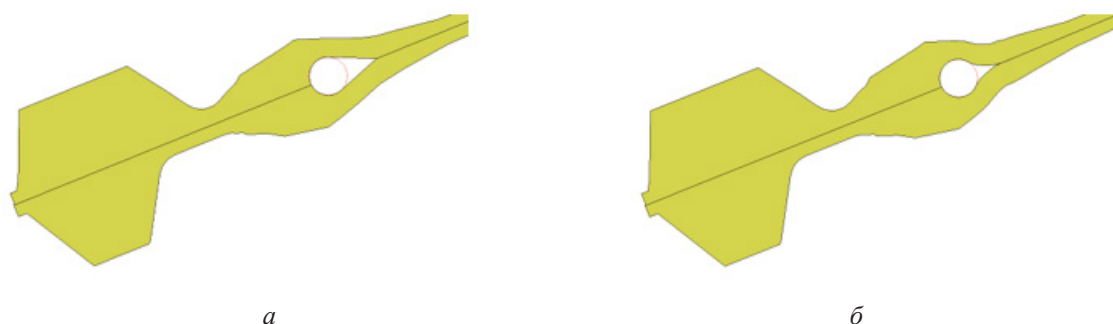


Рис. 9. Сечение заготовки на расстоянии 120 мм от торца:
а – вид оптимизированной заготовки с вложенной проволокой; б – вид после операции ДС

Fig. 9. Section of the workpiece at a distance of 120 mm from the end:
a – view of the optimized workpiece with inserted wire; b – view after the DW operation

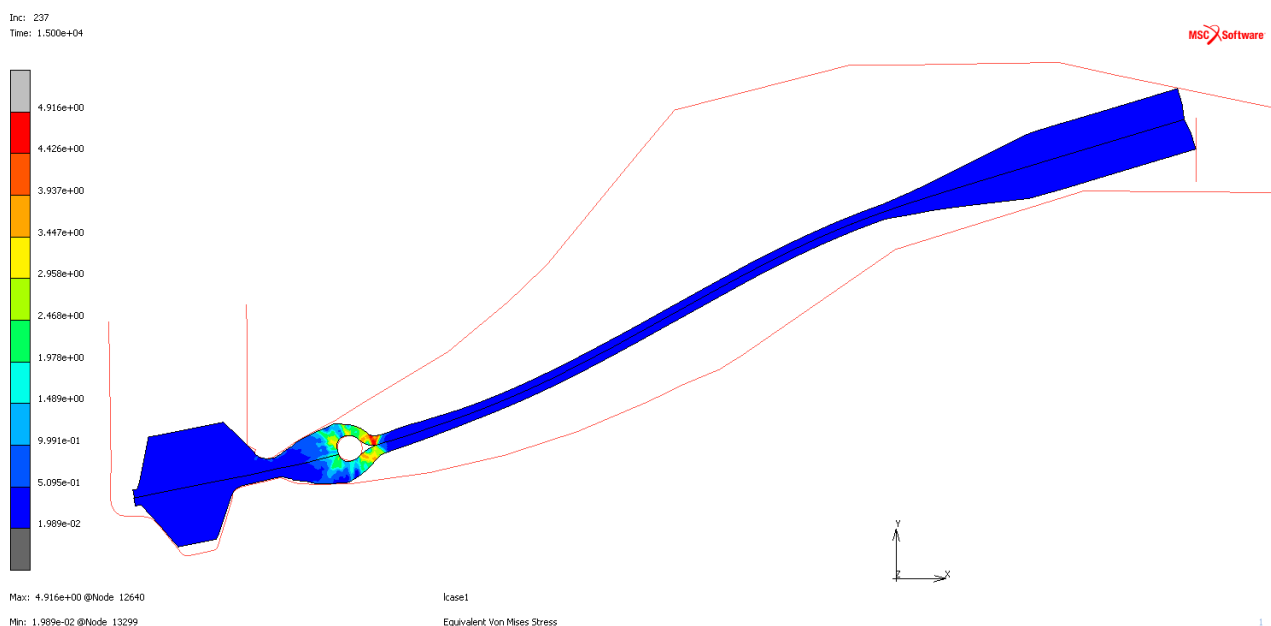


Рис. 10. Эквивалентные напряжения по Мизесу

Fig. 10. Equivalent stresses according to von Mises

Inc: 237
Time: 1.500e+04

MSC Software

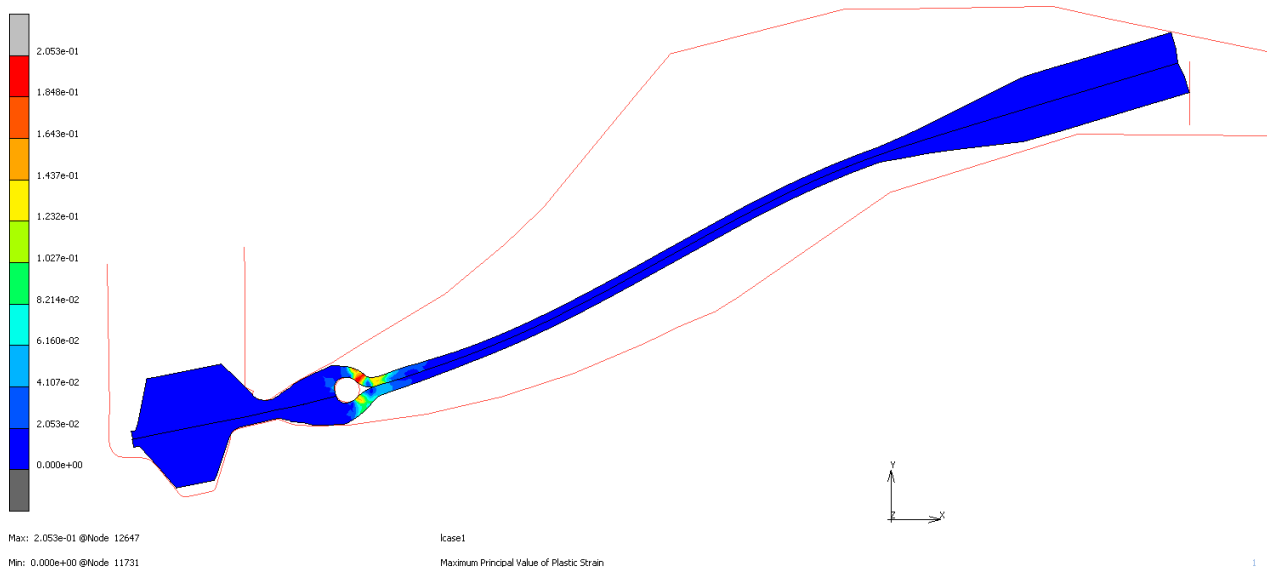


Рис. 11. Максимальные значения пластических деформаций (перемещений)

Fig. 11. Maximum values of plastic deformations (displacements)

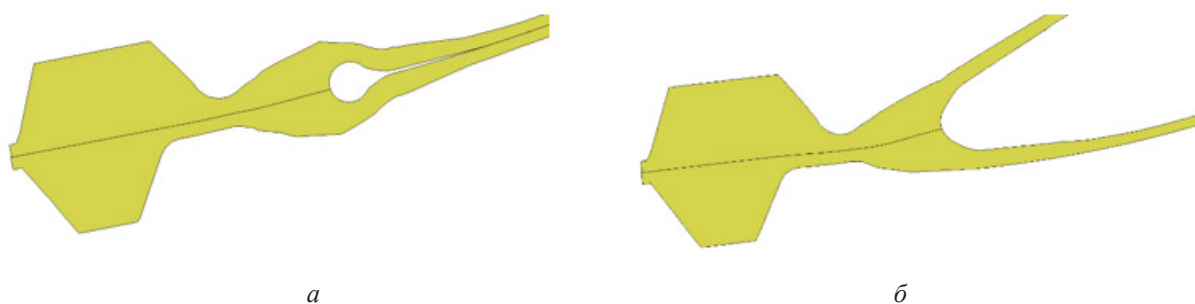


Рис. 12. Сечение заготовки на расстоянии 120 мм от торца:
а – вид до операции СПФ; б – вид после операции СПФ

Fig. 12. Section of the workpiece at a distance of 120 mm from the end:
a – view before the SPF operation; б – view after the SPF operation

Максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу после операции СПФ составило 10,45 МПа (рис. 13), что существенно ниже допускаемых напряжений для данного титанового сплава, а максимальное значение пластических деформаций составило 0,8 мм (рис. 14). Как и в случае расчета исходной геометрии, в рас-

чете оптимизированной геометрии по рисунку распределения напряжений и перемещений явно заметно отсутствие характерных локальных напряжений и равномерности «вытяжки» материала заготовки. Параметры конечно-элементной сетки: 35566 трехгранных элементов с размером стороны 0,22 мм.

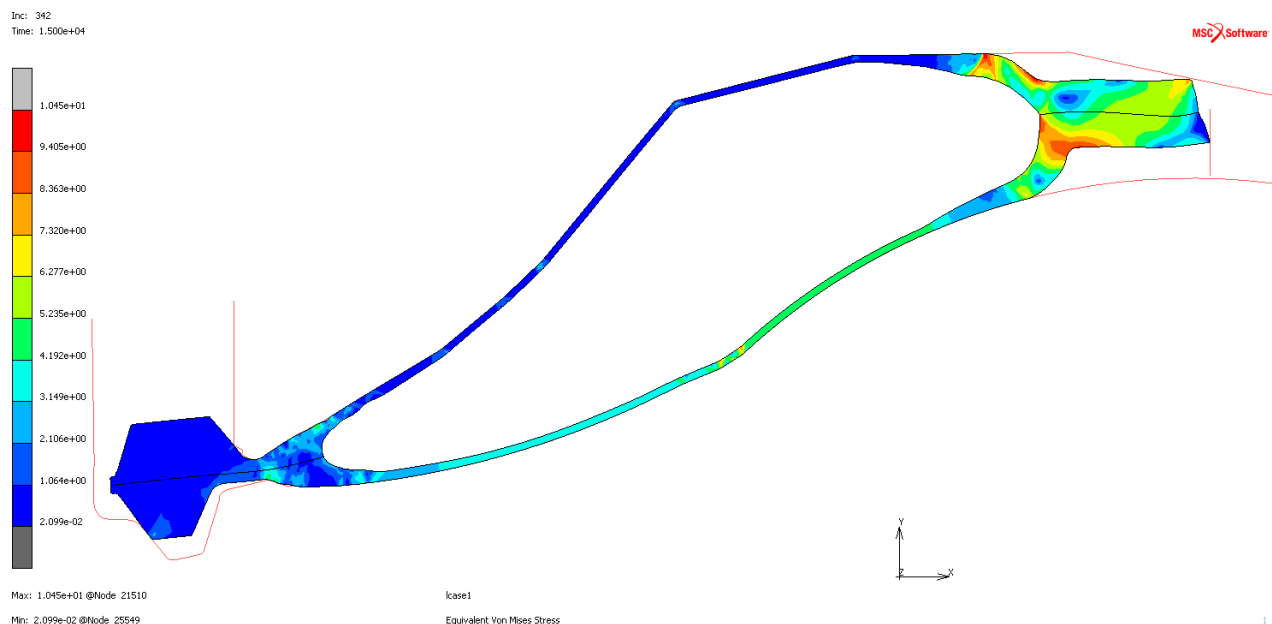


Рис. 13. Эквивалентные напряжения по Мизесу

Fig. 13. Equivalent stresses according to von Mises

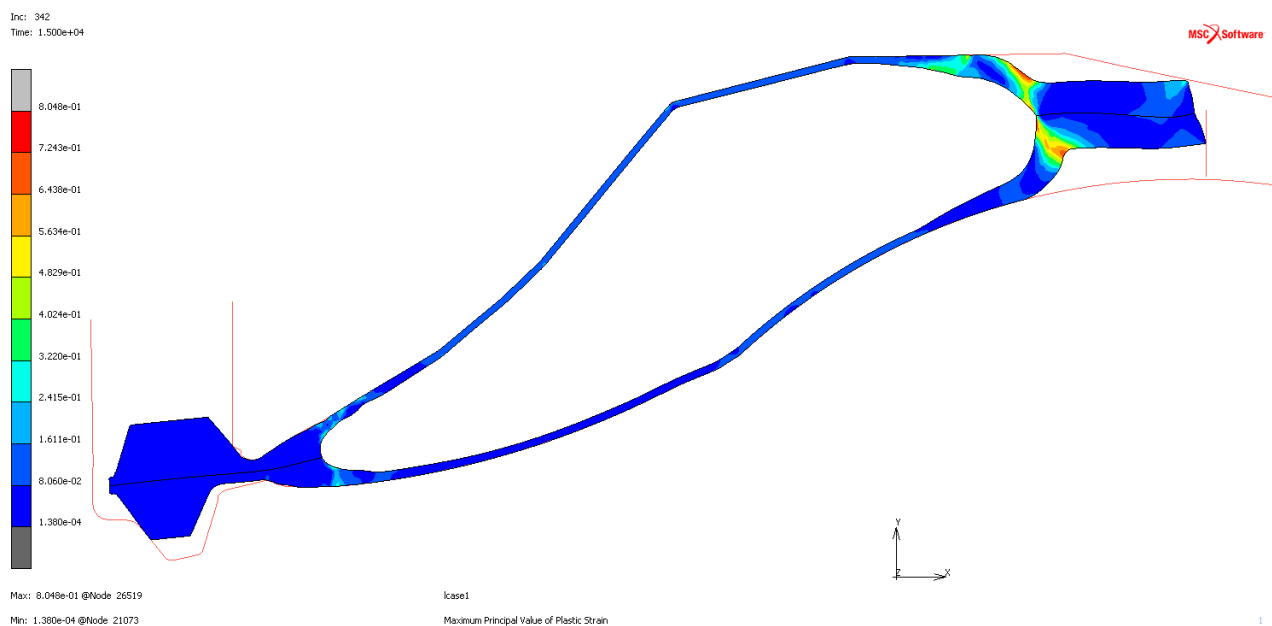


Рис. 14. Максимальные значения пластических деформаций (перемещений)

Fig. 14. Maximum values of plastic deformations (displacements)

По результатам моделирования произведена оптимизация геометрии половин заготовок, а также предложена технология, позволяющая получить внутренний радиус скругления. Измеренный радиус скругления по результатам моделирования максимально близок к проектируемому, отклонение геоме-

трии при этом не превышает 0,1 мм. Данная технология позволяет существенно уменьшить объем механической обработки внутреннего радиуса и обеспечить максимально качественное и эффективное прилегание входной защитной кромки к входной кромке композитной лопатки.

Максимальные перемещения для исходной и оптимизированной геометрии по

результатам моделирования операции СПФ приведены на рис. 15 и 16.

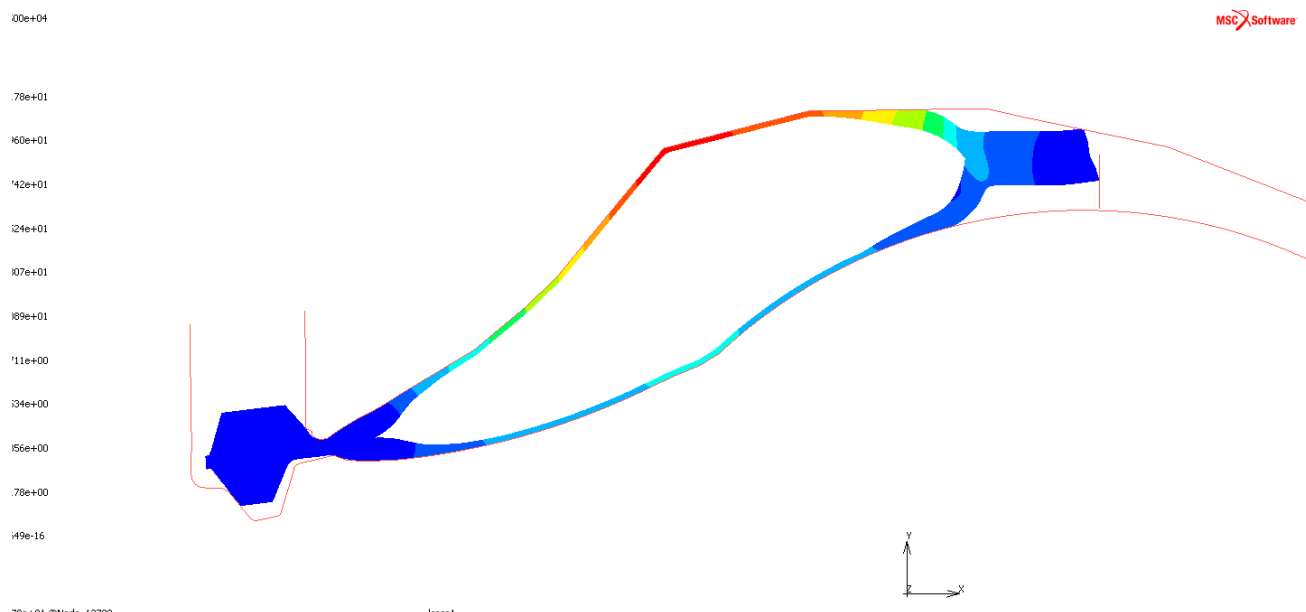


Рис. 15. Сечение заготовки 120 мм: результат моделирования процесса СПФ (максимальные значения перемещения) до оптимизации заготовки

Fig. 15. Workpiece cross-section 120 mm: result of the simulation of the SPF process (maximum displacement values) before workpiece optimization

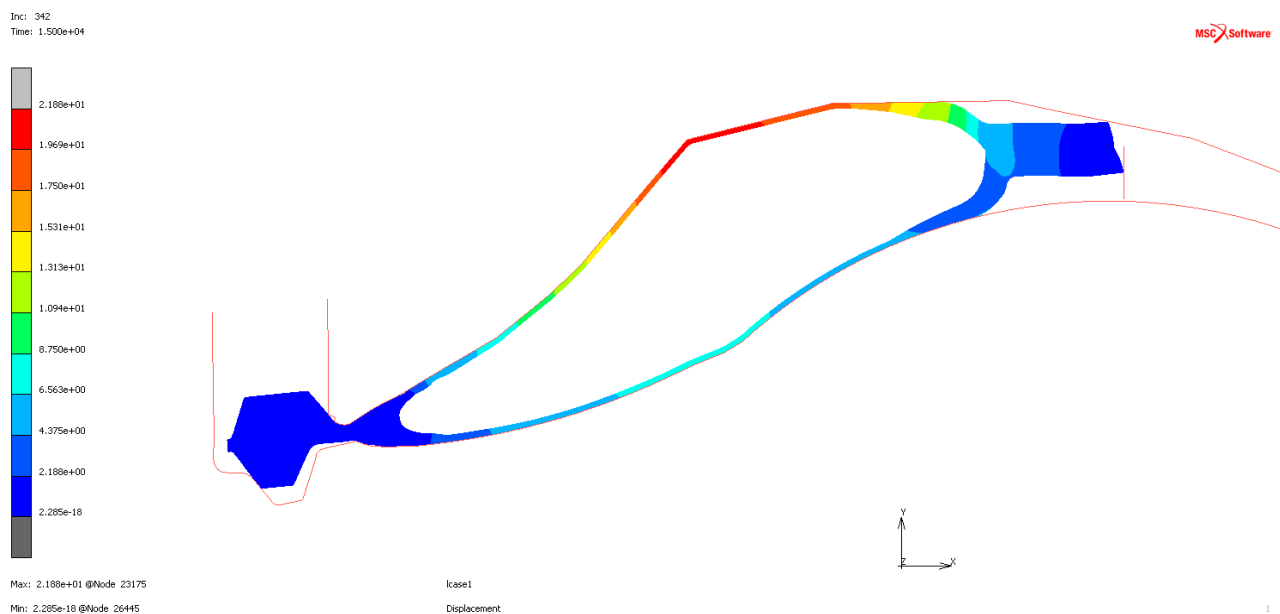


Рис. 16. Сечение заготовки 120 мм: результат моделирования процесса СПФ (максимальные значения перемещения) после оптимизации заготовки

Fig. 16. Workpiece cross-section 120 mm: simulation result of the SPF process (maximum displacement values) after workpiece optimization

Выводы

В заключение стоит отметить, что в процессе исследований были проведены моделирование и расчет методом конечно-элементного анализа операций «изотермическая гибка (крутка)», ДС и СПФ входной защитной кромки, изготовленной из титанового сплава ВТ6, композитной лопатки ГТД с целью оптимизации заготовки. Для достижения цели работы были решены следующие задачи: проанализированы существующие методы изготовления деталей методом СПФ; разработаны модели исследуемой заготовки в программном комплексе MSC Marc; проведены моделирование и конечно-элементный анализ операций «изотермическая гибка (крутка)», ДС и СПФ исследуемой заготовки до и после ее оптимизации; получены результаты моделирования и конечно-элементного анализа.

В результате исследований сделаны следующие выводы:

1. Показано, что существующая технология изготовления входной защитной кромки для полимерных композитных лопаток с использованием технологий ДС и последующей СПФ имеет особенность в виде характерного заострения во внутренней полости кромки.

2. Определена необходимость предварительной фрезеровки внутреннего радиуса входной кромки на заготовках для предотвращения заострения во внутренней полости кромки, так как радиус имеет геометрию отличную от заданной.

3. Возможности предотвращения грубого деформирования технологического радиуса входной кромки на этапе операции ДС можно добиться при вкладывании во внутреннюю полость проволоки круглого постоянного сечения диаметром 3,1 мм из нержавеющей стали с нанесенным на нее антидиффузионным покрытием.

Таким образом, по результатам моделирования подобрана оптимальная геометрия внутреннего сечения заготовки в характер-

ном наиболее опасном сечении, позволяющая разместить стальную проволоку диаметром 3,1 мм, препятствующую деформированию внутренней геометрии на этапе ДС и обеспечивающую формирование корректной геометрии внутренней полости получаемой детали с минимальным отклонением от целевой геометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shimov G.V., Burkin S.P. Fundamentals of technological processes of metal pressure processing: a textbook / ed. by S.P. Burkin. Ekaterinburg: Publ. House of the Ural University, 2014. 160 p. (In Russian) [Шимов Г.В., Буркин С.П. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / под общ. ред. С.П. Буркина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 160 с.].
2. Kaibyshev O.A. Superplasticity of industrial alloys. Moscow: Metallurgy, 1984. 264 p. (In Russian) [Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.].
3. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming. Arlington: Futurepast, Inc. 2005. 386 p.
4. Alabort E., Putman D., Reed R.C. Superplasticity in Ti-6Al-4V: Characterisation, modelling and applications // Acta Materialia. 2015. Vol. 95. P. 428–442. DOI:10.1016/j.actamat.2015.04.056.
5. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostructured materials obtained by intensive plastic deformation. Moscow: Logos, 2000. 272 p. (In Russian) [Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.].
6. Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh. Analysis of friction and wear of ultrafine-grained materials from the standpoint of thermodynamics // Vestnik UGATU. 2016. No. 2(72). P. 55–60. (In Russian) [Чертовских С.В., Шустер Л.Ш. Анализ трения и изнашивания ультрамелкозернистых материалов с позиции термодинамики // Вестник УГАТУ. 2016. № 2(72). С. 55–60].
7. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I., et al. Processes of plastic structure formation of metals. Minsk: Science and Technology, 1994. 232 p. (In Russian) [Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.].
8. Rybin V.V. Large plastic deformations and destruction of metals. Moscow: Metallurgy, 1986. 224 p. (In Russian) [Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.].

9. Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh. Dependence of tribological characteristics of titanium alloys on microstructure dispersion // Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure. 2008. No. 12. P. 18–24. (In Russian) [Чертовских С.В., Шустер Л.Ш. Зависимость триботехнических характеристик титановых сплавов от дисперсности микроструктуры // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. №12, 18–24 (2008)].
10. Stroganov G.B., Novikov I.I., Boytsov V.V., Pshirkov V.F. Use of superplasticity in metal forming. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 108 p. (In Russian) [Строганов Г.Б., Новиков И.И., Бойцов В.В., Пширков В.Ф. Использование сверхпластичности в обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1989. 108 с.].
11. Mulyukov R.R., Imaev R.M., Nazarov A.A., Imaev M.F., Imaev V.M. Superplasticity of ultrafine-grained alloys: experiment, theory, technologies. Moscow: Nauka, 2014. 284 p. (In Russian) [Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А., Имаев М.Ф., Имаев В.М. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.].
12. Stolyarov V.V., Shuster L.Sh., Chertovskikh S.V. Tribological behavior of ultrafine-grained titanium alloys // Trenie i Smazka v Mashinakh i Mekhanizмах. 2006. No. 10. P. 11–19. (In Russian) [Столяров В.В., Шустер Л.Ш., Чертовских С.В. Трибологическое поведение ультрамелкозернистых титановых сплавов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 10. С. 11–19].
13. Smirnov O.M. Metal pressure treatment in the state of superplasticity. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 184 p. (In Russian) [Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.].
14. Huang S.J., Chertovskikh S.V., Semenov V.I., Shuster L.S. Friction and wear of commercially pure titanium with different microstructure from the view point of thermodynamic analysis // Materials Science Forum. 2016. Vol. 863. P. 50–56. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.863.50.
15. Misochenko A.A., Chertovskikh S.V., Shuster L.S., Stolyarov V.V. Influence of grain size and contact temperature on the tribological behaviour of shape memory Ti49.3Ni50.7 alloy // Tribology Letters. 2017. Vol. 65(4). Art. 131. DOI: 10.1007/s11249-017-0917-6.
16. Kruglov A.A., Musina R.Sh., Enikeev F.U. Computer modeling of the process of superplastic forming of hollow three-layer structures // Tekhnologiya Mashinostroeniya. 2015. No. 2. P. 57–62. (In Russian) [Круглов А.А., Мусина Р.Ш., Еникеев Ф.У. Компьютерное моделирование процесса сверхпластической формовки полых трехслойных конструкций // Технология машиностроения. 2015. № 2. С. 57–62].
17. Kruglov A.A., Karimova A.F., Enikeev F.U. Finite element modeling of folding during the superplastic forming of corrugated core panels // Letters on Materials. 2018. Vol. 8(2). P. 174–177. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-174-177.
18. Murzina G.R., Ganieva V.R., Kruglov A.A., Enikeev F.U. Modeling of the process of superplastic forming of hemispherical shells from blanks of different profiles // Letters on Materials. 2021. Vol. 11(4). P. 548–552. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-548-552.
19. Panchenko E.V., Alekseev P.A. Modeling of three-dimensional problems of superplastic forming of thin-walled shells // Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure. 2012. No. 3. P. 28–32. (In Russian) [Панченко Е.В., Алексеев П.А. Моделирование трехмерных задач сверхпластической формовки тонкостенных оболочек // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 3. С. 28–32].
20. Stepanenko N.Yu., Chertovskikh S.V., Lukyanov V.V., Astanin V.V. Manufacturing technology of protective edges for polymer composite products // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. 2024. No. 8. P. 197–203. (In Russian) [Степаненко Н.Ю., Чертовских С.В., Лукьянов В.В., Астанин В.В. Технология изготовления защитной кромки для полимерных композитных изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 197–203].
21. Yang Liu, Chaoyang Sun, Zhiqiang Li, Bing Zhao, Xintao Zhu, Sinuo Xu, Lingyun Qian. Superplastic constitutive modeling of TA32 alloy with two-phase characteristics // International Journal of Mechanical Sciences. 2025. Vol. 296. Art. 110298].
22. Temis Yu.M., Khudyakov A.P. Mathematical modeling of isothermal punching and superplasticity forming of hollow fan blade // Vestnik UGATU. 2015. No. 3(69). P. 50–60. (In Russian) [Темис Ю.М., Худяков А.П. Математическое моделирование операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки изготовления полых лопатки вентилятора // Вестник УГАТУ. 2015. № 3(69). С. 50–60].
23. Vasiliev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V., et al. Composite materials: Handbook / ed. by Vasiliev V.V., Tarnopolsky Yu.M. Moscow: Mechanical Engineering, 1990. 512 p. (In Russian) [Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. Васильева В.В., Тарнопольского Ю.М. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.].
24. Bolton W. Composite materials. Metals, alloys, polymers, ceramics, composites. Moscow: Dodeka XXI, 2007. 320 p. (In Russian) [Болтон У. Композиционные материалы. Металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. М.: Додэка XXI, 2007. 320 с.].
25. Karimbaev T.D., Luppov A.A., Petrov Yu.A., Ezhov A.Yu., Afanasyev D.V. Turbomachine Composite

Blade. Patent for invention of the Russian Federation No. 2350757, 27.03.2009. Application: 2007134993/06, 21.09.2007. (In Russian) [Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Петров Ю.А., Ежов А.Ю., Афанасьев Д.В. Композиционная лопатка турбомашины. Патент на изобретение РФ № 2350757, 27.03.2009. Заявка: 2007134993/06, 21.09.2007].

26. Astanin V.V., Berdin N.V., Lukyanov V.V., Starovojtov S.V., Utkin A.Yu., Karimbaev T.D., Chernyshov A.A. Manufacture method of front edge fan

blade strengthening patch // Russian Federation Patent No. 2711697 dated 01/21/2020, priority 04/15/2019. Application No. 2019111210. (In Russian) [Астанин В.В., Бердин Н.В., Лукьянов В.В., Старовойтов С.В., Уткин А.Ю., Каримбаев Т.Д., Чернышов А.А. Способ изготовления упрочняющей накладки передней кромки лопатки вентилятора. Патент РФ № 2711697 от 21.01.2020, приоритет 15.04.2019. Заявка № 2019111210].