

УДК 621.98.04

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НДС ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ЯЧЕИСТОЙ КОНСТРУКЦИИ

А. М. Смыслов¹, В. К. Бердин², Н. В. Бердин³, В. В. Лукьянов⁴

¹smyslovam@yandex.ru, ²berdinvk@mail.ru, ³berdin@bk.ru, ⁴lukianovv@bk.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 23 апреля 2014 г.

Аннотация. В программной среде *ABAQUS* выполнено математическое моделирование процесса сверхпластической формовки пакета из 3-листовых заготовок при получении многослойной ячеистой конструкции плоского типа. Встроенный в программную среду оптимизационный модуль позволил построить зависимость изменения рабочего давления формовки от времени, при которой пластическое течение материала в очаге деформации развивалось с постоянной и заданной пользователем скоростью деформации. Анализ напряженного и деформированного состояния выявил особенности формовки, протекающей в три стадии.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка; диффузионная сварка; многослойная ячеистая конструкция; конечно-элементное моделирование.

Одним из элементов современного газотурбинного двигателя является широкохордная лопатка полой конструкции, изготовленная из титанового сплава ВТ6. Процесс получения лопатки сложен и включает в себя выполнение большого количества разнообразных операций, в том числе диффузионную сварку и сверхпластическую формовку [1–6].

При выполнении операции формовки диффузионно сваренной заготовки лопатки-пакета зачастую используют температурно-скоростные режимы, которые обеспечивают в материале с определенным типом микроструктуры возникновение явления сверхпластичности, что способствует развитию равномерного пластического течения и снижению степени разнотолщинности стенок формируемого ячеистого наполнителя лопатки.

Полая лопатка имеет сложную конструкцию, характеризуемую переменным аэродинамическим профилем, а также переменной толщиной стенок элементов лопатки. Поэтому при выполнении операции сверхпластической формовки полого пера выдержать температурно-скоростные условия деформирования материала на заданном уровне, опираясь только на результаты экспериментальных исследований, достаточно сложно.

Вместе с тем нахождение оптимального закона изменения рабочего давления во время

формовки, при котором скорость течения материала в выбранной точке критического сечения лопатки остается неизменной и равной заданной, за счет применения современных программных продуктов и вычислительных комплексов, позволяет решить эту задачу.

В настоящей работе исследуется формирование напряженного и деформированного состояния (НДС) при выполнении конечно-элементного моделирования процесса сверхпластической формовки 3-слойных ячеистых панелей плоского типа из титанового сплава ВТ6 с применением граничных условий, обеспечивающих постоянство скорости деформации листовых заготовок пакета на заданном уровне в течение всего процесса его формообразования. Математическое моделирование выполнялось в среде программного комплекса *ABAQUS* (учебная версия).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для изготовления полых лопаток обычно применяют плоский пакет, состоящих из трех заготовок, выборочно сваренных между собой диффузионной сваркой за счет применения анти-диффузионного покрытия [3–5]. Из пакета в процессе выполнения ряда формообразующих операций и сверхпластической формовки получают сложную 3-мерную полую конструкцию

с наполнителем, который имеет периодическую структуру ферменного типа с переменными размерами.

Для упрощения решения задачи конечно-элементного моделирования операции сверхпластической формовки с использованием специальных граничных условий был выбран процесс изготовления плоской панели, представленной на рис. 1. Анализ литературных данных показал, что поверхность листовых заготовок, образующих внутреннюю полость пакета, может быть плоской, а также может иметь борозды глубиной 0,1...0,3 мм для размещения в них антидиффузионного покрытия [3, 4]. В данной задаче в качестве исходного объекта был выбран пакет, у которого борозды расположены на внутренней поверхности двух внешних заготовок.

Внешние листовые заготовки пакета имеют толщину 2,0 мм. Глубина борозд равна 0,1 мм.

Толщина внутренней заготовки пакета равна 0,8 мм.

При выполнении численного моделирования процесс диффузионной сварки не рассматривался. Считалось, что после диффузионной сварки механические свойства сварного соединения и прилегающей к нему зоны полностью соответствуют механическим свойствам основного материала. Для описания механического поведения титанового сплава ВТ6 при сверхпластической формовке в работе использована механическая модель упруго-вязкого течения материала. Упругая составляющая модели определена значением модуля Юнга $E = 1,4 \times 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,4$. Вязкая составляющая описывает процесс ползучести и задана зависимостью степенного вида (1), записанная в символах справочника теории программного комплекса *ABAQUS* как

$$\dot{\epsilon} = A \dot{\epsilon}^n \exp\left(-\frac{m}{t}\right) \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}$ – эквивалентная скорость деформации ползучести; $\dot{\epsilon}^{cr}$ – эквивалентные напряжения ползучести; t – время; A , n и m – константы, задаются пользователем в зависимости от температуры деформации.

В табл. 1 представлены значения констант формулы (1) применительно к сплаву ВТ6 для температуры деформации материала $T \sim 900^\circ \text{C}$, которые были получены приближением экспериментальных данных первичных диаграмм [6].

Условия контакта внешней поверхности пакета (деформируемого тела) с инструментом (аналитически жестким телом) описывали мо-

делью трения Зибеля с коэффициентом трения, равным 0,1.

Таблица 1

Константы зависимости степенного вида (1)

$A, \text{c}^{-1}/\text{МПа}$	n	$t, \text{с}$
$5,726 \cdot 10^{-7}$	2,045	0

Форма панели (рис. 1) позволила решать задачу в двумерной, плоско-деформированной постановке, с учетом циклической симметрии наполнителя. В задаче не рассматривается формовка краевой области пакета. Высота панели равна 13,0 мм, ширина зоны диффузионной сварки равна 5,0 мм, ширина формуемой части наполнителя заготовки равна 10,0 мм.

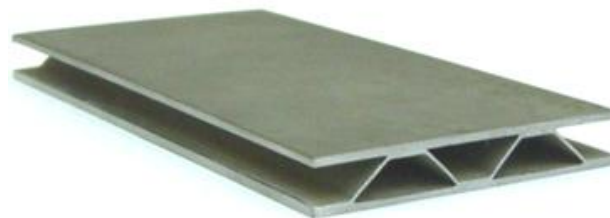


Рис. 1. Полая плоская панель с наполнителем ячеистого типа

По условию задачи моделирования процесса изготовления панели, определение НДС необходимо выполнить при обеспечении специальных условий нагружения. Зависимость величины прикладываемого давления от времени должна обеспечить в контрольной точке формуемой части наполнителя заготовки пакета постоянную скорость деформации, не превышающую заданную величину. Значение заданной скорости деформации было выбрано равным $5,0 \times 10^{-4} \text{c}^{-1}$, в контрольной точке, расположенной в области перехода «внутренняя заготовка – внешняя заготовка пакета».

Программный комплекс *ABAQUS* дает пользователям возможность решать такого рода задачи. Для этого он располагает специальной процедурой "Solution-dependent amplitude", которая обеспечивает постоянство скорости деформации при формовке на уровне, не превышающем заданную скорость, путем контролируемого изменения рабочего давления.

При выполнении квази-статического анализа *ABAQUS* осуществляет поиск максимального значения скорости деформации ползучести и сравнивает эту величину с заданной с последующим увеличением или уменьшением амплитуды рабочего давления на очередном шаге нагружения. Этот контрольный алгоритм сравни-

тельно прост и достаточно надежен. Он не преследует цель точного приближения к заданной скорости деформации, а направлен на получение схемы изменения давления формовки во времени с приемлемой для практического использования точностью.

Задача решается за два последовательных шага. На первом шаге выполняется статическое решение, на котором к пакету кратковременно прикладывается небольшое по величине рабочее давление, вызывающее в нем упругую деформацию. На втором шаге выполняется квазистатическое решение задачи ползучести, при котором изменение амплитуды рабочего давления контролируется процедурой "Solution-dependent amplitude". При выполнении квазистатического решения, параметр "Accuracy tolerance" контролирует приращение амплитуды рабочего давления по времени, повышая точность получаемого решения. ABAQUS сравнивает значения скорости эквивалентной деформации в начале и в конце шага приращения. Полученная разница должна быть меньше, чем заданная точность, поделенная на время шага приращения. В противном случае решение повторяется с меньшим шагом приращения по времени. Более подробно о выборе параметра "Accuracy tolerance", можно узнать из описания теории программного комплекса, в разделе "Help". В данной задаче это значение было выбрано равным 0,5 %.

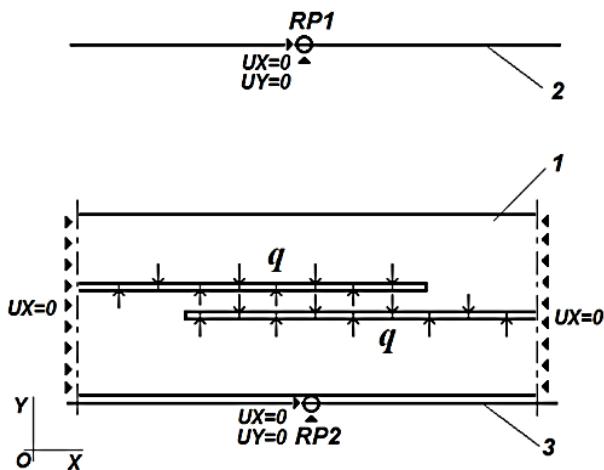


Рис. 2. Схема задачи и граничные условия

На рис. 2 представлена формализованная схема задачи и граничные условия. Модель включает в себя деформируемое тело 1, которым описывают пакет и аналитически жесткое тело 2 и 3 (оснастка). Деформируемое тело состоит из 932 четырехугольных конечных эле-

ментов. В зоне перехода средней заготовки во внешнюю сетку сгущали, сохраняя ее прямоугольную форму. Условия зеркальной симметрии приложены к торцам фрагмента пакета ($UX = 0$). Условия закрепления жесткого тела 2 и 3 ($UX = 0, UY = 0, ROTZ = 0$) осуществляли через точку "Reference point" (RP1 и RP2). К поверхностям заготовок, образующих внутреннюю полость пакета приложено рабочее давление q . На первом шаге решения максимальная величина q была равна 0,01 МПа, которая увеличивалась от 0,0 МПа в соответствии с опцией "Ramp load". На втором шаге начальное значение приложенного рабочего давления было увеличено до 0,3 МПа. На протяжении второго шага амплитуда изменялась автоматически в соответствии с процедурой "Solution-dependent amplitude" и с использованием опции "Amplitude, auto". Максимальное значение амплитуды прикладываемого давления было ограничено величиной 100,0.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3, а и б представлены эпюры распределения эквивалентных напряжений и деформации при формовке пакета на заключительных шагах решения. Из рис. 3, а видно, что напряжения распределены не равномерно. Наиболее высокая равномерность наблюдается в формируемом ребре панели, где величина эквивалентных напряжений равна $\sim 19,0$ МПа.

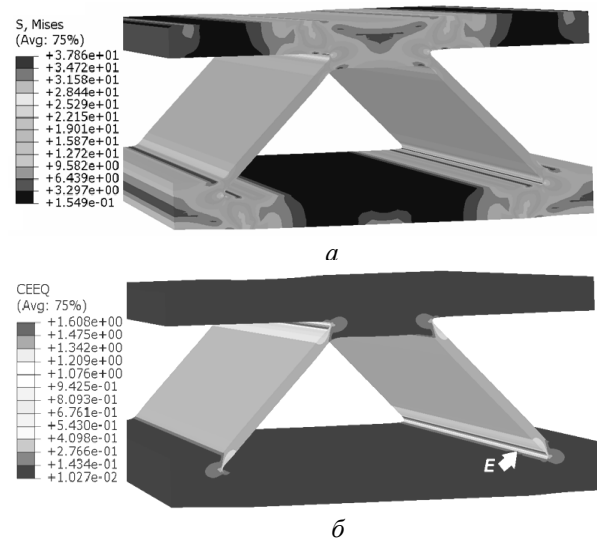


Рис. 3. Эпюры распределения эквивалентных напряжений и деформаций на заключительном этапе формовки: а – эквивалентные напряжения; б – эквивалентная деформация

Максимальные напряжения сосредоточены в зоне перехода «ребро–обшивка панели» и равны 37,7 МПа. Минимальные напряжения, рав-

ные $\sim 3,3$ МПа, наблюдаются в центральной области обшивки панели.

В отличие от эквивалентных напряжений, эквивалентная деформация (рис. 3, б) распределена в панели таким образом, что образуются два участка. Первый участок – ребро панели. Здесь деформация распределена равномерно и равна $e = 0,28$. Второй участок расположен в обшивках панели. Деформация на этом участке равна $0,1-0,19$. В зоне перехода «ребро–обшивка панели» деформация носит локальный характер. Она сосредоточена вблизи поверхности ребра панели. Там ее величина наибольшая и равна $e = 1,6$.

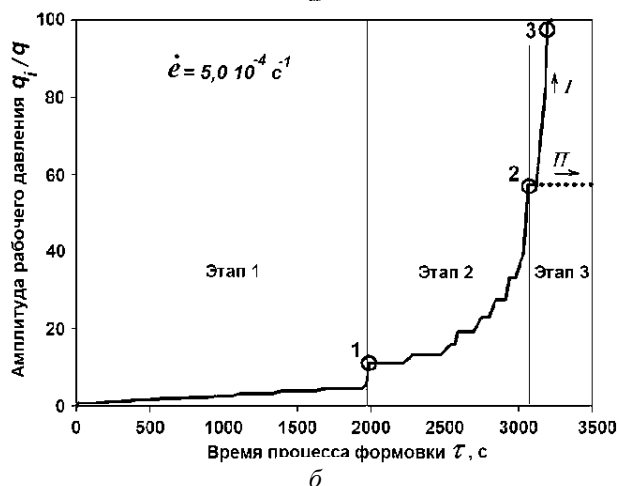
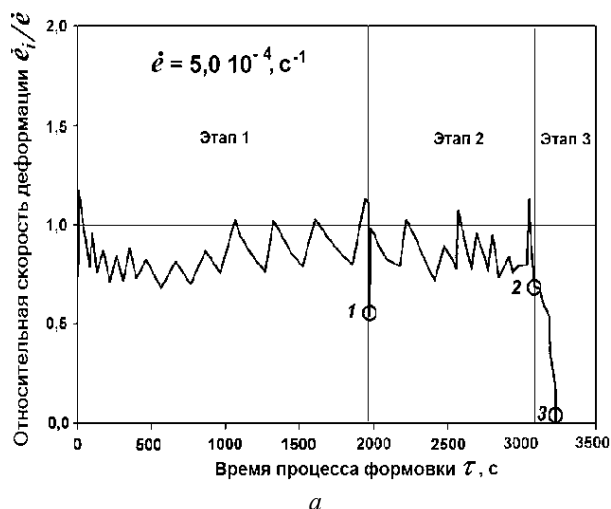


Рис. 4. Расчетные значения кривой изменения относительного рабочего давления во время формовки при постоянной скорости деформации материала в точке “Е”: а – изменение отношения текущей скорости деформации к заданной во время формовки; б – изменение амплитуды рабочего давления во время формовки

Таким образом, результаты показывают, что такое сочетание напряженного и деформированного состояний не вызывает появления локального течения материала в формируемом

ребре панели на заключительных шагах решения задачи.

Как уже говорилось, главной особенностью решаемой задачи является моделирование процесса формовки в условиях постоянства скорости деформации ползучести в точке, где ее значение максимально. Из рис. 3, б следует, что эта точка находится в области перехода «ребро наполнителя–обшивка панели», точка Е. При этом условием задачи определено, что формовка должна проходить таким образом, чтобы скорость деформации ползучести в точке Е не превышала значения $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Насколько точно программа выдерживает это условие, можно судить по кривой изменения отношения текущей скорости деформации $\dot{\epsilon}_i$ к заданной $\dot{\epsilon}$ в точке Е в зависимости от времени формовки, представленной на рис. 4, а. Очевидно, что для практического использования результатов вычислений алгоритм программы выполняет это условие удовлетворительно.

Одним из наиболее важных результатов вычислений является расчетная зависимость рабочего давления формовки от времени. На рис. 4, б можно видеть эту зависимость в виде $q_i/q = f(\tau)$, где q_i – текущая величина рабочего давления, а q – начальное значение приложенного давления. На втором шаге решения $q = 0,3$ МПа.

Анализ зависимости $q_i/q = f(\tau)$ позволяет выделить на кривой три характерных перегиба, которые можно связать с тремя основными этапами формовки плоской панели. Первый этап формовки расположен между 0 и точкой 1 (рис. 4, а, б). На этом участке пакет свободно формируется. При этом происходит растяжение ребра до тех пор, пока листы обшивки пакета не коснутся поверхности штампа (рис. 5, а). На втором этапе формовки, который расположен между точками 1 и 2 (рис. 4, а, б), рабочее давление увеличивается значительно быстрее, чем на первом этапе. Это связано с тем, что формовку ребра начинает контролировать процесс распрямления обшивки пакета и его касание с поверхностью штампа (рис. 5, б). При этом происходит постепенное уменьшение неподкрепленной части поверхности обшивки панели, за счет которой создается необходимая результирующая сила для растяжения ребра.

Второй этап формовки завершается в точке 2. Он не обеспечивает полного соприкосновения обшивки панели с оснасткой. По завершении второго этапа на внешней поверхности панели напротив ребра присутствует канавка глубиной Δ (рис. 5, б).

Третий этап формовки начинается за точкой 2 (рис. 4, а, б). На этом этапе в процессе

дальнейшей формовки под действием рабочего давления канавка исчезает. Необходимо отметить, что дальнейшее изменение рабочего давления сопровождается падением скорости деформации (рис. 4, а). Иными словами, на третьем этапе формовки алгоритм программы уже не обеспечивает поддержание скорости деформации на заданном уровне. Поэтому дальнейшее изменение рабочего давления можно выполнять, как минимум, по двум направлениям.

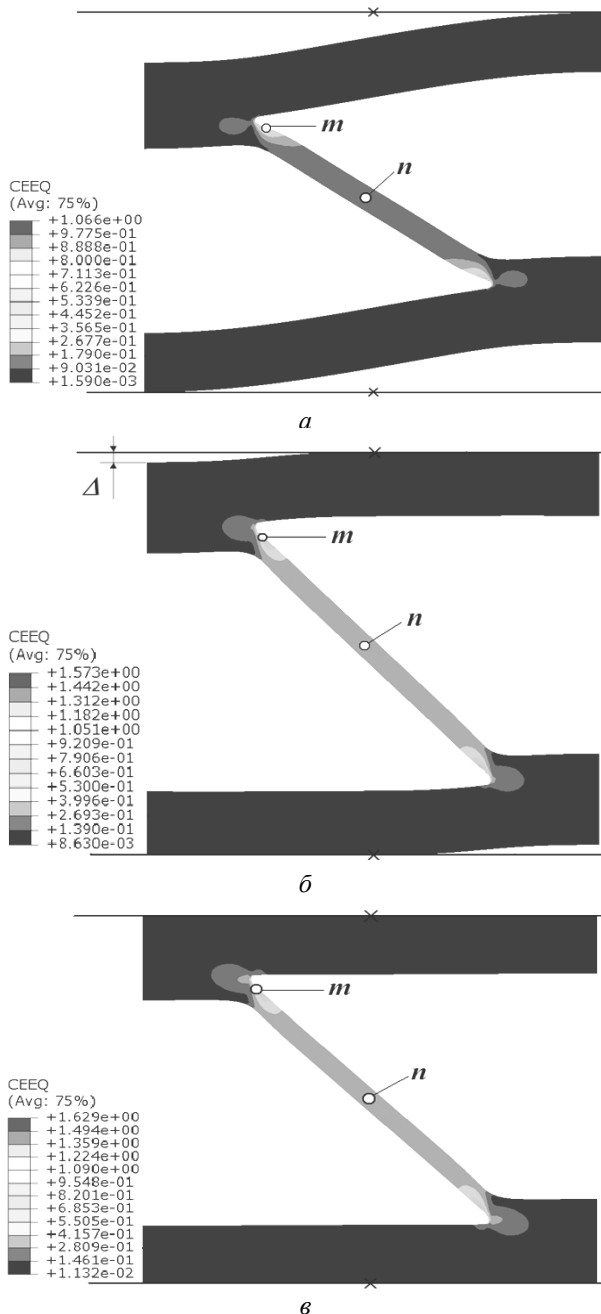


Рис. 5. Эпюра распределения эквивалентной деформации на основных этапах сверхпластической формовки: а – первый этап; б – второй этап; в – третий этап

Направление **I**, рассчитанное программой, сопровождается еще большим ростом рабочего

давления. И второй путь, направление **II**, который обычно используют в практических экспериментах, когда величина рабочего давления остается неизменной и равной значению давления на втором шаге. Время формовки на третьем этапе может быть рассчитано или выбрано экспериментально. На рис. 5, в представлен фрагмент панели по завершении третьего этапа формовки, когда величина формируемого давления соответствует точке 3 (рис. 4, б). В этом случае можно видеть, что $\Delta = 0$.

Таким образом, несмотря на то что скорость деформации на третьем этапе постепенно снижается, выбранное начальное $q_{init} = 0,3$ и предельное значение амплитуды приложенного давления $q_{max} = 100$, а также оптимизационный алгоритм программы все же обеспечивают завершение процесса формовки панели и получение панели без канавок.

Рассмотрим, как меняется напряженное и деформированное состояние в характерных точках формируемого пакета, в качестве которых выберем точку *m* – точку в области с максимальным значением эквивалентной деформации ползучести, и точку *n* – в центре ребра формируемого пакета.

Напряженное состояние рассмотрим на примере анализа изменения относительного гидростатического давления ($K1$) и коэффициента Лодэ ($K2$), которые определены в соответствии с выражением (2) и (3) [7].

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_i – эквивалентные напряжения.

Таблица 2

Параметры напряженного и деформированного состояний

№	Этап формовки	Место анализа	Напряженное состояние		Деформированное состояние
			K1	K2	e_i
1	Первый этап	<i>m</i> (край)	0,86	0	1,1
		<i>n</i> (центр)	1,99	0	0,13
2	Второй этап	<i>m</i> (край)	0,53	0	1,57
		<i>n</i> (центр)	0,69	0	0,31
3	Третий этап	<i>m</i> (край)	-1,03	0	1,63
		<i>n</i> (центр)	-0,56	0	0,34

В табл. 2 сведены значения параметров $K1, K2$ и e_i в характерных точках пакета *m* и *n* в конце каждого из трех этапов формовки.

Вне зависимости от выбранной точки развитие пластической деформации на всех этапах происходит в соответствии со схемой простого сдвига, о чем свидетельствует коэффициент K_2 , который во всех случаях равен 0.

Значения коэффициента K_1 , равные 0,86 и 1,99, показывают, что первый этап формовки по сравнению с другими этапами характеризует более жесткая схема нагружения. При этом величина эквивалентной деформации в точке m имеет наибольшее значение 1,0066. А в центре ребра, в точке n величина деформации сравнительно мала и равна 0,13.

В связи с этим высокое значение эквивалентной деформации в точке m и близость ее к краю диффузионного соединения, прочность которого не всегда равна прочности основного материала, является основной причиной, по которой именно в этой точке осуществляется контроль за скоростью деформации ползучести в процессе формовки.

На втором этапе формовки деформация ползучести в точке m достигает величины 1,57. Величина деформации ползучести в точке n достигает значения 0,31. Деформация на втором этапе происходит на фоне уменьшения показателя жесткости системы в точках m и n , в которых значения K_1 становятся соответственно равными 0,53 и 0,69.

Третий этап формовки осуществляется в условиях относительно мягких схем нагружения ($K_2 = -1,0 \dots -0,5$) с небольшим приростом величины деформации ползучести и не является сложным этапом выполнения формовки панели.

Таким образом, по совокупности значений параметров НДС, критической точкой при сверхпластической формовке панели на первом этапе является точка m , а на втором этапе – точка n .

Одним из основных показателей успешности выполнения процесса сверхпластической формовки панелей выбранной конструкции (рис. 1), является степень равномерности распределения пластической деформации вдоль ребра панели и как следствие – толщины его стенки.

На рис. 6 показано распределение эквивалентной деформации вдоль ребра панели.

На графике представлены две кривые. Первая кривая – распределение деформации на поверхности ребра. Вторая кривая показывает распределение деформации в центре ребра. Видно, что деформация в центре ребра распределена вдоль длины ребра относительно равномерно.

Известно, что температурно-скоростные режимы сверхпластической деформации определяют деформационное поведение материала, и оказывают решающее влияние на равномерность его пластического течения в очаге деформации [2, 5]. Существует понятие оптимального интервала скоростей деформации, в котором материал можно деформировать с минимальными напряжениями на значительную степень деформации. Для большинства листовых титановых сплавов этот интервал равен $1 \times 10^{-4} \dots 1 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

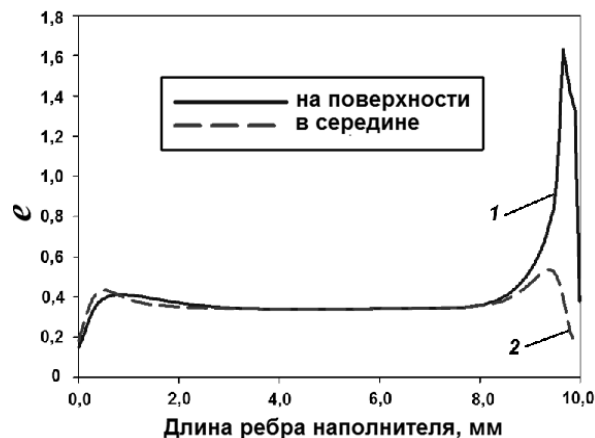


Рис. 6. Распределение эквивалентной деформации вдоль ребра панели на последнем шаге решения

В этой связи уместным является вопрос, каким образом заданная скорость деформации может влиять на расчетную кривую нагружения и на распределение деформации ползучести в ребре панели в конце формовки. Для чего в дальнейших расчетах были выбраны три значения заданной скорости деформации: $\dot{\epsilon}_1 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $\dot{\epsilon}_2 = 5,0 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; и $\dot{\epsilon}_3 = 1,0 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

На рис. 7 представлены кривые изменения амплитуды рабочего давления q_i/q в зависимости от времени формовки для трех скоростей деформации в полулогарифмических координатах. Результаты вычислений показали, что скорость деформации не влияет на стадийность процесса формовки. Характерные граничные точки 1, 2 и 3 присутствуют на всех кривых нагружения. Вместе с тем скорость деформации очень сильно влияет на положение точек по координатам «время» и «амплитуда». Из рисунка также видно, что уменьшение на порядок используемой скорости деформации, приводит к увеличению на порядок времени процесса формовки. При этом амплитуды в конце первого этапа меняются относительно друг друга примерно в три раза. Однако в абсолютном значении эти изменения можно считать невысокими.

В то же время переход со второго на третий этап формовки сопровождается существенным снижением амплитуды приложенного рабочего давления: с 80 до 40 в абсолютных величинах. Значения амплитуд в конце формовки во всех трех случаях равны 100 и определяются условиями задачи.

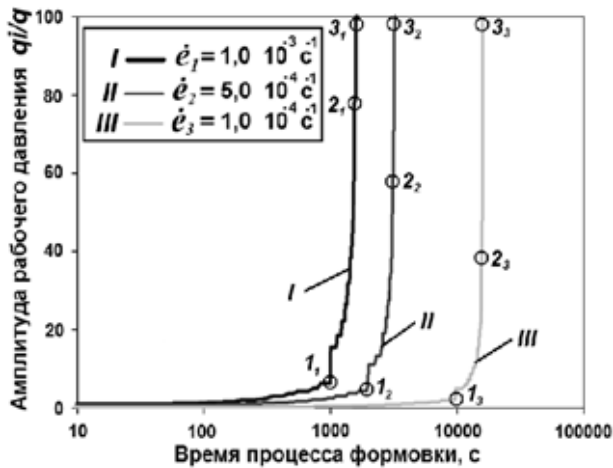


Рис. 7. Кривые изменения амплитуды рабочего давления для трех заданных скоростей деформации: I – $\dot{\epsilon}_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; II – $\dot{\epsilon}_2 = 5 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; III – $\dot{\epsilon}_3 = 1 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$

Анализ распределения эквивалентной деформации вдоль ребра не выявил какого-либо влияния скорости деформации на неравномерность распределения деформации вдоль ребра (рис. 8). Наблюдается лишь незначительное изменение глубины канавки на внешней поверхности панели в конце второго этапа формовки.

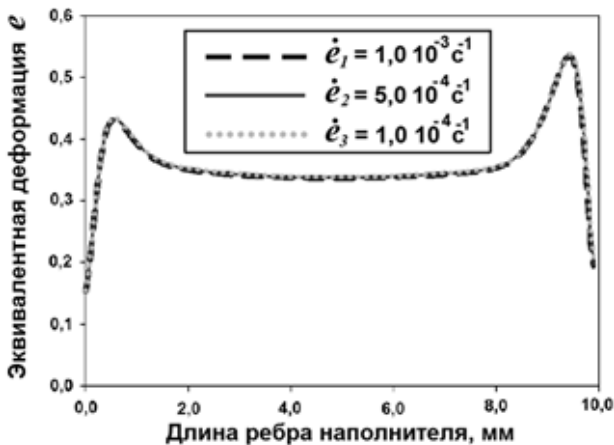


Рис. 8. Распределение эквивалентной деформации вдоль ребра наполнителя панели при трех заданных скоростях деформации

В табл. 3 представлены значения Δ в зависимости от скорости деформации.

Таблица 3

Глубина канавки Δ при различных скоростях эквивалентной деформации

Скорость деформации, c^{-1}	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Глубина канавки Δ , мм	0,25	0,29	0,16

Однако установить значимую корреляцию полученных результатов распределения деформации в ребре и скорости деформации по трем экспериментальным точкам не представляется возможным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты решения показали, что влияние скорости деформации на кривую зависимости $q_i/q=f(\tau)$ очевидно. Однако очевидно и то, что значение эквивалентной деформации ползучести и ее распределение вдоль деформируемого ребра не чувствительны к изменению заданной скорости деформации при формовке. Вероятная причина этого – выбранная механическая модель течения материала. В пользу этого говорит отсутствие в постановке задачи понятия величины оптимальной скорости сверхпластической деформации с точки зрения максимального значения коэффициента скоростного упрочнения, или максимального значения относительного удлинения [2, 5, 7].

Тем не менее, по мнению авторов работы, программный комплекс ABAQUS и встроенный модуль "Solution-dependent amplitude" является весьма полезным, инструментом нахождения закона изменения рабочего давления формовки во времени, обеспечивающего постоянство заданной скорости ползучести в очаге деформации. А выбор заданной скорости ползучести, соответствующей оптимальной скорости сверхпластического течения материала – это задача практического эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М.: Машиностроение, 1968. 331 с. [N. F. Kazakov, *Diffusion bonding in vacuum*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1968.]
2. Кайбышев О. А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Metallurgiya, 1975. 280 с. [O. A. Kayshev, *Plasticity and superplasticity of metals*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1975.]
3. Патент РФ 2412017 (C2), МКП В21D53/78 В23P15/04 В21K3/04. Способ изготовления полой вентиляторной лопатки / Н. Л. Кокшаров, С. А. Харин, В. Н. Климов, и др. [N. L. Koksharov, et al., *Method of hollow fan blade*

production, (in Russian), Patent RF 2412017 (C2) МКР В21D53/78 В23P15/04 В21К3.]

4. **Патент РФ 2477191**, МКР В21D53/78, В21D26/02, В23К20/18, В23К101/02. Способ изготовления полой вентиляционной лопадки / Р. Р. Мулюков, А. А. Иноземцев, Р. В. Сафиуллин и др. [R. R. Mulyukov, et al., *Method of hollow fan blade production*, (in Russian), Patent RF 2477191, МКР В21D53 / 78, В21D26 / 02, В23К20 / 18, В23К101 / 02.]

5. **Чумаченко Е. Н., Смирнов О. М. Цепин М. А.** Сверхпластичность: материалы, теория, технология. М.: КомКнига, 2005. 350 с. [E. N. Chumachenko, O. M. Smirnov, M. A. Czeplin, *Superplasticity :materials, theory, technology*, (in Russian). Moscow: KomKniga, 2005.]

6. **Бердин В. К.** Моделирование получения элементов пустотелых лопаток с силовым наполнителем "X"-типа // Сборник трудов третьей конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH, (Москва 23-24 апр. 2003). М.: Полигон-пресс, 2003. С. 347-355. [V. K. Berdin, "Modeling of hollow blade element with filling component of 'X' type production," (in Russian), in *Proc. 3rd Conf. of Program Users of CAD-FEM GMBH*, Moscow, Russia, 2003, pp. 347-355.]

7. **Колмогоров В. Л.** Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. 688 с. [V. L. Kolmogorov, *Mechanics of metals treatments by forging*, (in Russian), Moscow: Metallurgiya, 1986.]

ОБАВТОРАХ

СМЫСЛОВ Анатолий Михайлович, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вак.-плазм. модиф. поверхности.

БЕРДИН Валерий Кузьмич, доц. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по материаловедению в машиностроении (ИПСМ, 1993). Иссл. в обл. производства широкохордных полых лопаток ГТД из титановых сплавов методом СПФ/ДС.

БЕРДИН Николай Валерьевич, мл. науч. сотр. НИЧ каф. технологии машиностроения. М-р техн. и технол. по материаловед. и технол. новых материалов (УГАТУ, 2008). Готовит дис. о формировании микроструктуры в титановом сплаве ВТ5 в условиях сложного нагружения.

ЛУКЪЯНОВ Василий Васильевич, асп. каф. технологии машиностроения. М-р техн. и технол. по материаловед. и технол. новых материалов (УГАТУ, 2011). Готовит дис. по технологии получения полых лопаток паровых турбин АЭС.

METADATA

Title: Feature of strain state formation during superplastic forming of multilayered sandwich structure.

Authors: A. M. Smyslov, V. K. Berdin, N. V. Berdin, V. V. Lukyanov.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: Berdinvk@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 4 (65), pp. 53-60, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Mathematical modeling of superplastic forming of three sheet stack during production of a flat shape multilayered sandwich structure was performed in FEM-code ABAQUS. The built-in the program optimization module has allowed to get a dependency between working pressure and time by using which during forming panel material has deformed at given by user and constant strain rate. Analysis of stress and strain state conditions has revealed peculiarities of superplastic flow proceeding in three main stages.

Key words: superplastic forming; diffusion bonding; multi-layer sandwich construction; finite element modeling.

About authors:

SMYSLOV, Anatoly Mikhailovich, Prof., Dept. of Engineering technology. Dipl. Engineer (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. (Ufa, 1993).

BERDIN, Valeryi Kusmich, Dept. of Engineering mechanic. Dipl. Engineer (UAI, 1977). Cand. of Tech. Sci. (Ufa, 1993).

BERDIN, Nikolai Valerievich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Engineering technology. Magistrate of technic and technology (UGATU, 2008).

LUKIANOV, Vasili Vasilevich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Engineering technology. Magistrate of technic and technology (UGATU, 2011).