

А. В. Боткин, Е. В. Вареник, Д. Д. Ардуанова, Г. В. Саморуков

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ БАШМАКА ЛОПАТКИ В ПРОЦЕССЕ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

В результате компьютерного моделирования, проведенного с использованием программного комплекса DEFORM 3D, установлено влияние силы и угла предварительной затяжки оснастки на габаритные размеры и напряженное состояние башмака лопатки при линейной сварке трением. *Линейная сварка трением; моделирование; DEFORM 3D*

ВВЕДЕНИЕ

Процесс линейной сварки трением (ЛСТ) успешно применяется в авиастроении для изготовления блисков.

Линейная сварка трением – метод соединения в твердом состоянии, при котором выделяемое в результате трения тепло используется для получения сварного соединения. Материал, который образует соединение, никогда не разогревается до своей температуры плавления, а только деформируется в вязко пластичном состоянии. Данный процесс инициируется благодаря приложению большой нормальной силы к поверхности, с последующим колебанием одного из двух компонентов, которые должны быть соединены. В результате возникающего на поверхности трения тепла материал в месте соединения нагревается. По мере повышения температуры материал начинает претерпевать пластическую деформацию и образуется грат. Затем колебания деталей прекращают, происходит охлаждение соединения, в то время как заданная нормальная нагрузка продолжает действовать (проковка).

Если режим сварки был подобран правильно, то шов обладает хорошей сплошностью – поры, инородные включения, макродефекты отсутствуют. При испытаниях на растяжение

образцы разрушаются по основному материалу, т. е. шов прочнее основного металла. Это происходит за счет своеобразной термомеханической обработки в зоне шва. И металл в зоне шва имеет мелкокристаллическую структуру и наклеп [1, 4–7].

Однако имеются существенные ограничения, сдерживающие его применение. Эти ограничения связаны со сложностью необходимого оборудования (требуется специальное оборудование, рассчитанное на большие скорости и большие осевые нагрузки, оно должно обладать высокой прочностью, воспринимать значительные радиальные колебания и т. д.); узким спектром применения метода (только стыковое и Т-образное соединение); невозможностью применения в непроизводственных условиях и ограниченностью формы и размеров сечения деталей.

Точность взаимного расположения приваренных элементов обеспечивается сварочной оснасткой, которая должна обеспечивать:

- передачу усилия осадки и сдвигового усилия;
- приемлемый уровень рабочих напряжений в замковой части лопатки в процессе сварки;
- допустимый уровень деформаций деталей и отсутствие появления зазоров в процессе сварки под действием усилия сдвига;
- отсутствие контакта деталей оснастки с пером лопатки после затяжки и в процессе сварки.

Поскольку поверхность лопатки имеет криволинейный профиль, ее фиксация в сварочной машине представляется сложной задачей, и распространенным путем ее решения является создание напуска на заготовке лопатки [0, 0, 0]. Напуск предназначен для зажатия в оснастку и удаляется после сварки.

Контактная информация: 8-927-3315167

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

В рассматриваемой конструкции заготовки лопатки напуск представляет собой параллелограмм $72 \times 14 \times 16$ мм, усилие зажатия, препятствующее сдвигу элементов оснастки, прикладывается вдоль хорды лопатки. Такая схема обеспечивает надежную фиксацию заготовки лопатки, однако продольное укорочение лопатки приводит к формированию остаточных напряжений в зоне сварки. В данной работе на основе анализа напряженного состояния заготовки лопатки предложена схема крепления, обеспечивающая не только надежное крепление заготовки, но и минимальный уровень продольной деформации от усилий зажатия.

Для обеспечения точности сварки необходимо предусматривать мероприятия для устранения перекосов и погрешностей расположения свариваемых поверхностей.

Цель настоящей работы – развитие научно-методологического обеспечения проектирования технологического процесса сварки трением лопаток к диску на основе результатов моделирования механических условий деформации заготовки лопатки.

МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе исследований проводили компьютерное моделирование процесса линейной сварки трением лопатки (рис. 1) с использованием программного комплекса DEFORM 3D [2].

При проведении компьютерного моделирования были приняты следующие условия и допущения:

1. В модели материала лопатки используются параметры сплава ВТ-6 [3], (аналог данного сплава в программном комплексе DEFORM 3D – Ti6Al-4V [70–1850 F (20–1000) °C]) в исходном состоянии является изотропным и в нем отсутствуют начальные напряжения и деформации, лопатка принимается упругим телом (Elastic); начальное напряжение течения при 20 ° равно 1172 мПа;

2. Часть оснастки 2 (рис. 1) абсолютно жесткое тело (Rigid);

3. Температура лопатки и части оснастки постоянная – 20 °С;

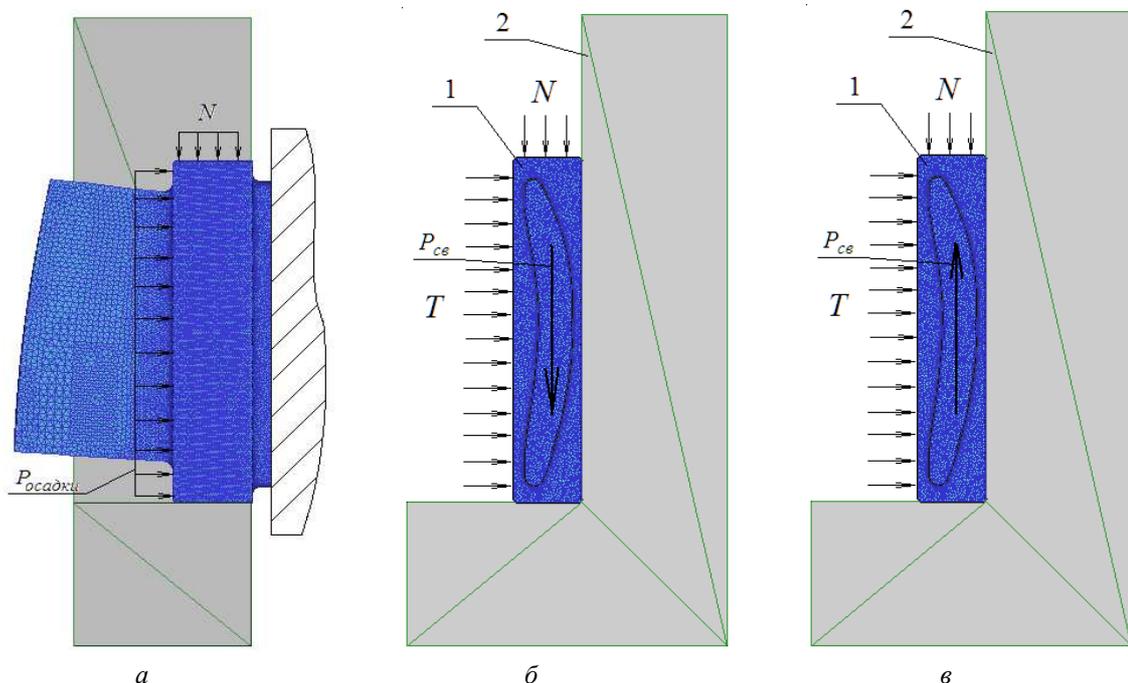


Рис. 1. Схема к моделированию процесса сварки трением: 1 – лопатка, 2 – часть оснастки; а – при движении верхней оснастки влево и вправо; б – при движении верхней оснастки влево; в – при движении верхней оснастки вправо

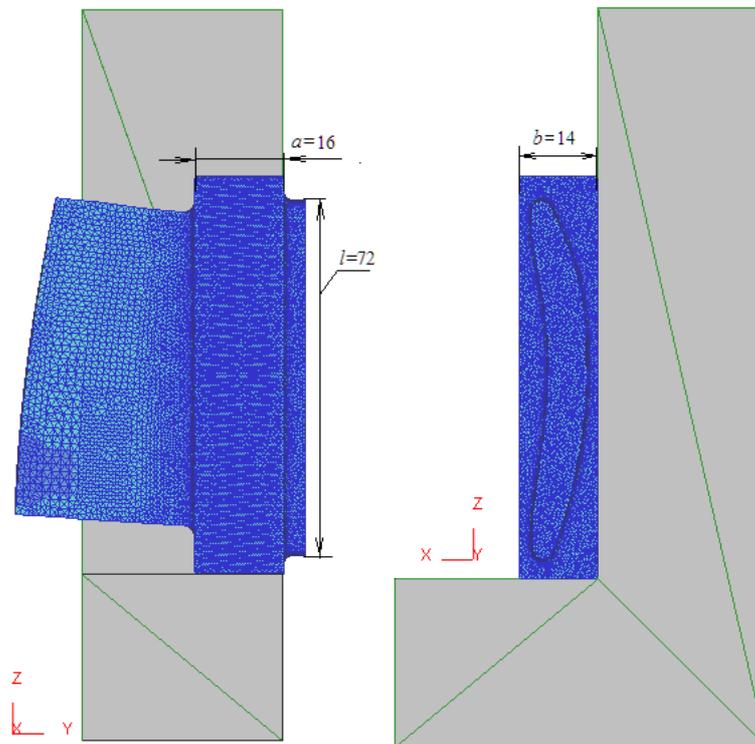


Рис. 2. Габаритные размеры башмака лопатки

4. К узлам поверхности башмака лопатки, не контактирующим с частью оснастки 2, прикладывались равные узловые силы, которые рассчитывались исходя из количества узлов и значений, составляющих N и T силы $P_{\text{зат}}$ при затяжке винтов. Расчеты производились для нескольких значений силы затяжки: $P_{\text{зат}} = 45, 60, 75$ кН при углах затяжки $45 \dots 90^\circ$.

5. К узлам поверхности трения башмака лопатки прикладывались узловые силы трения, действующие со стороны верхней оснастки, равные силе ответной части диска, сварочной силе $P_{\text{св}} = 40$ кН (рис. 3, б, в), при этом при движении верхней оснастки влево силы были направлены против оси Z (рис. 4, а), а при движении верхней оснастки вправо силы были направлены по оси Z (рис. 4, б). Узловую силу трения рассчитали исходя из $\tau_{\kappa} = \tau_s, F_{\text{тр}} = \tau_s S_{\text{рп}}$, где $S_{\text{рп}}$ – площадь рабочей поверхности лопатки.

6. К узлам поверхности сопряжения пера с башмаком лопатки прикладывали нормальные узловые силы осадки $P_{\text{осад}} = 40$ кН (рис. 5);

7. Количество конечных элементов лопатки – 192766.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования напряженного состояния башмака лопатки при предварительном зажатии лопатки в оснастке показали, что распределение напряжений неравномерное.

Напряженное состояние башмака в момент зажатия лопатки в оснастке зависит от силы затяжки, чем больше сила, тем выше максимальное значение интенсивности напряжений (рис. 3–4).

Для минимизирования изменения габаритных размеров башмака лопатки получили оптимальный угол для предварительной затяжки инструмента – 83° путем варьирования разных углов затяжки.

Максимальные значения интенсивности напряжений наблюдаются в местах приложения продольной составляющей силы затяжки на кромках башмака (рис. 3, в, рис. 4, в) и зависят от угла затяжки. Так, при силе затяжки 75 кН и угле затяжки 83° напряжение составляет 300 МПа, а при угле затяжки 75° 360 МПа.

Характер распределения интенсивности напряжений не зависит от силы затяжки (рис. 3–4).

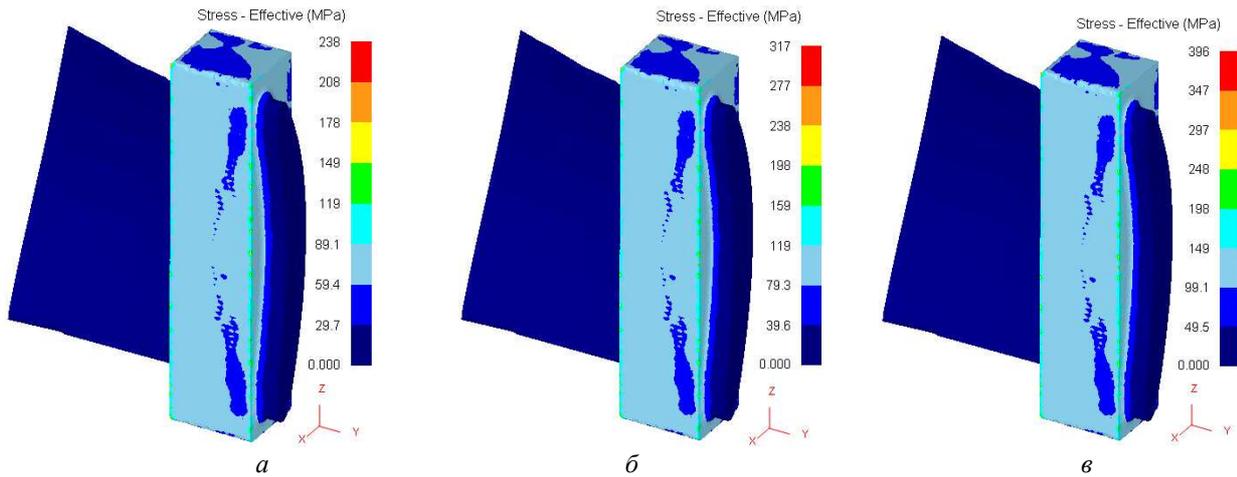


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений по поверхности башмака (угол зажатия 83°) в момент зажатия лопатки в оснастке силой затяжки: *a* – 45 кН; *б* – 60 кН; *в* – 75 кН

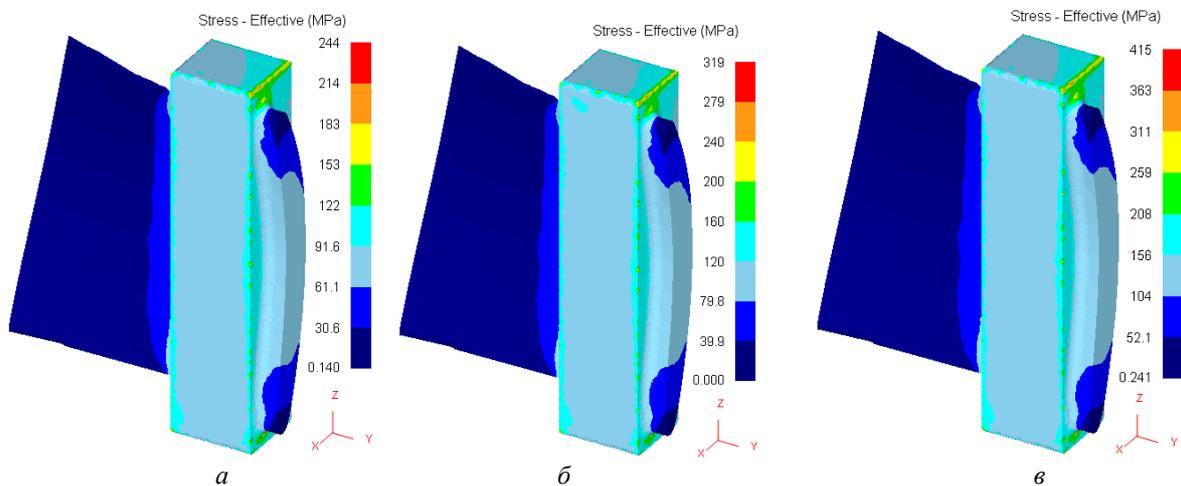


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений по поверхности башмака (угол зажатия 75°) в момент зажатия лопатки в оснастке силой затяжки: *a* – 45 кН; *б* – 60 кН; *в* – 75 кН

Результаты моделирования напряженного состояния башмака лопатки в процессе сварки трением, показали, что распределение напряжений также неравномерное.

При движении верхней оснастки вправо максимальное значение интенсивности напряжений при угле затяжки 83° достигает значения 380 МПа, при угле затяжки 75° 430 МПа и наблюдается в месте сопряжения башмака с областью сварки (рис. 7, *в*, рис. 8, *в*).

При движении верхней оснастки влево, максимальное значение интенсивности напряжений при угле затяжки 83° достигает 430 МПа, при угле затяжки 75° 500 МПа и наблюдается в месте сопряжения башмака с областью сварки (рис. 5, *в*, рис. 7, *в*).

Напряженное состояние башмака лопатки в процессе сварки трением зависит от силы затяжки, чем больше сила, тем выше максималь-

ное значение интенсивности напряжений, а также от направления движения верхней оснастки (рис. 5–8). Когда направление движения верхней оснастки совпадает с продольной составляющей силы затяжки, напряженное состояние башмака характеризуется наибольшим значением интенсивности напряжений при угле затяжки 83° равным 430 МПа, что составляет 0,37 от напряжения течения материала лопатки, что ниже на 70 МПа по сравнению с максимальной величиной интенсивности напряжений при угле затяжки 75° .

Изменения габаритных размеров башмака лопатки в момент зажатия лопатки в оснастке показаны на рис. 9–10. В момент зажатия башмака лопатки в оснастке, размеры *l*, *b* уменьшаются, размер *a* увеличивается. Значения укорочения и удлинения габаритных размеров башмака зависят от силы затяжки.

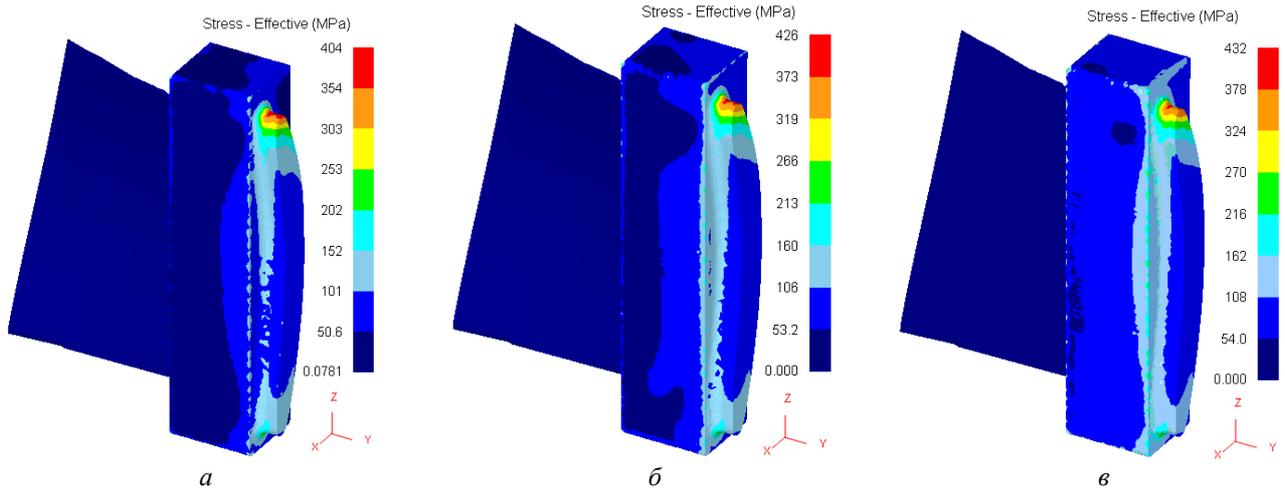


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений по поверхности башмака (угол зажатия 83°) при движении верхней оснастки влево при силе затяжки: *a* – 45 кН; *б* – 60 кН; *в* – 75 кН

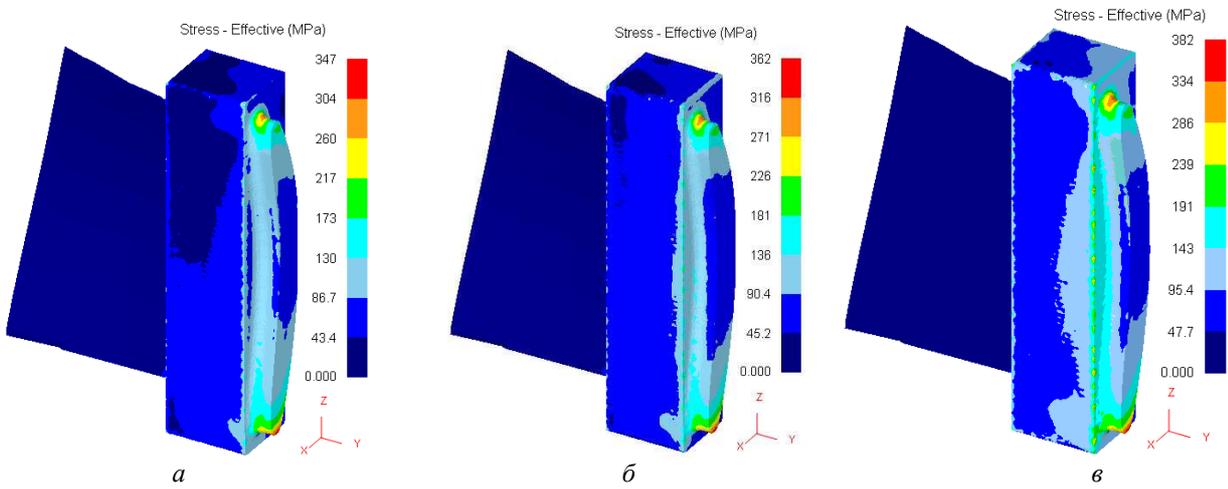


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений по поверхности башмака (угол зажатия 83°) при движении верхней оснастки вправо при силе затяжки: *a* – 45 кН; *б* – 60 кН; *в* – 75 кН

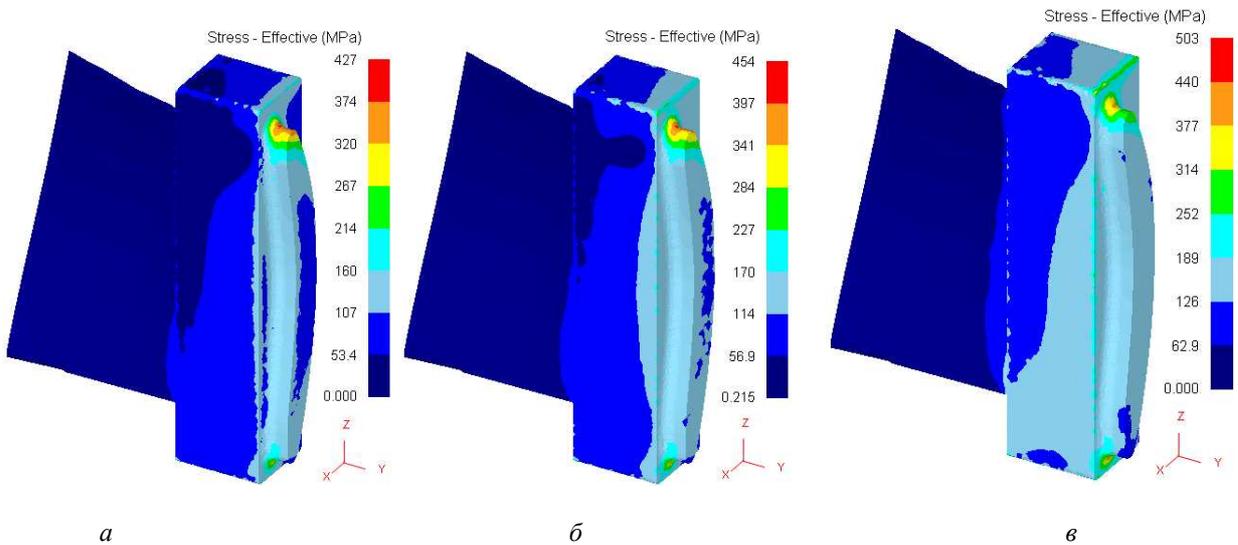


Рис. 7. Распределение интенсивности напряжений по поверхности башмака (угол зажатия 75°) при движении верхней оснастки влево при силе затяжки: *a* – 45 кН; *б* – 60 кН; *в* – 75 кН

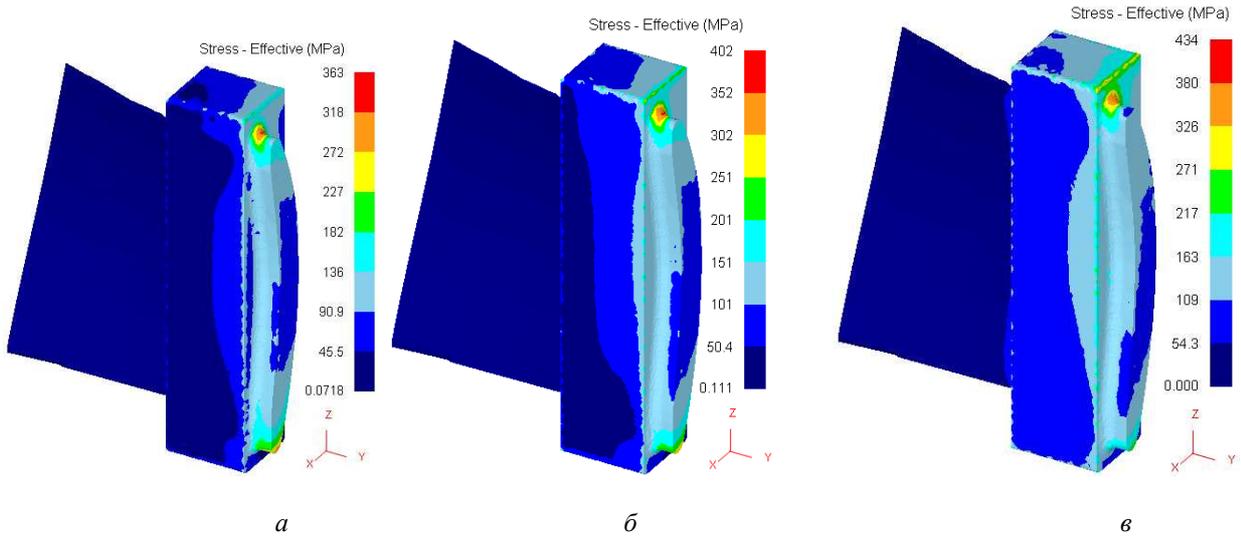


Рис. 8. Распределение интенсивности напряжений по поверхности башмака (угол зажатия 75°) при движении верхней оснстки вправо при силе затяжки: *а* – 45 кН; *б* – 60 кН; *в* – 75 кН

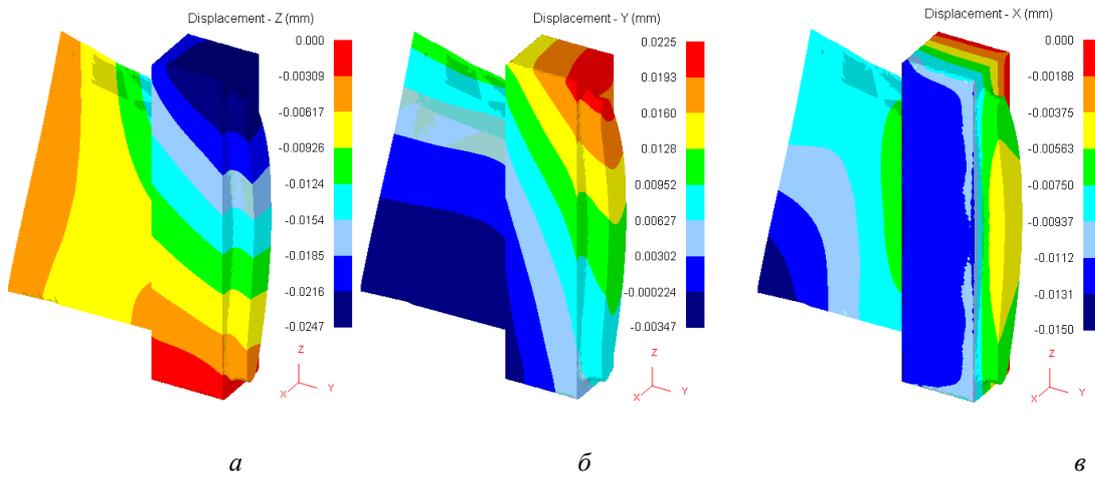


Рис. 9. Перемещения элементов лопатки в момент зажатия лопатки в оснстке (угол затяжки 83°) силой затяжки 75 кН в направлении оси: *а* – OZ; *б* – OY; *в* – OX

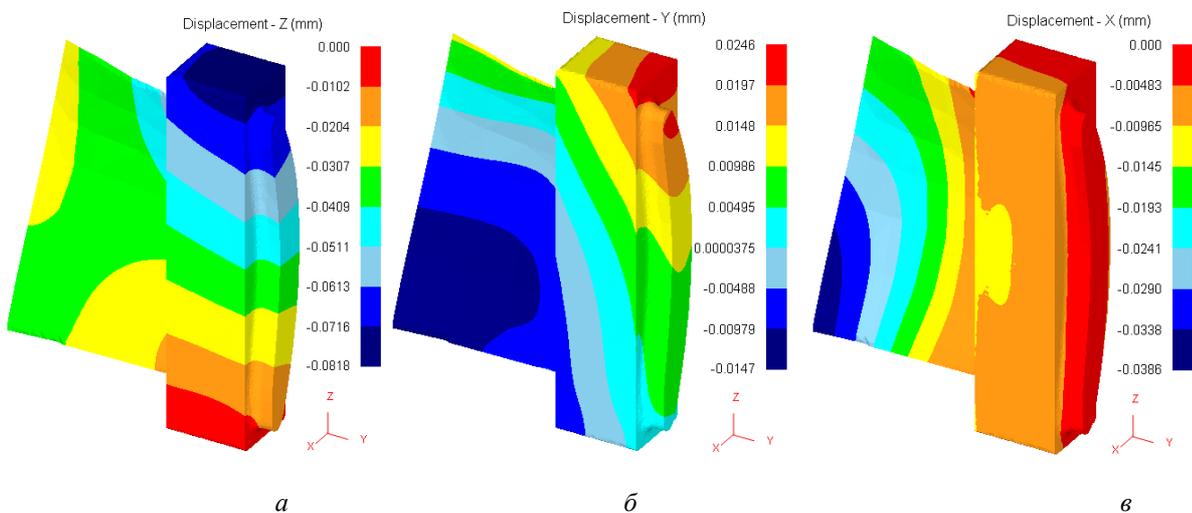


Рис. 10. Перемещения элементов лопатки в момент зажатия лопатки в оснстке (угол затяжки 75°) силой затяжки 75 кН в направлении оси: *а* – OZ; *б* – OY; *в* – OX

С увеличением силы затяжки укорочения и удлинения увеличиваются. Укорочение размера l неравномерно, при силе затяжки 75 кН составляет 0,0216...0,0247 мм (угол затяжки 83 °) (рис. 9, *а*), и 0,0716...0,0818 мм (угол затяжки 75 °) (рис. 10, *а*). Больше укорочение размера l башмака наблюдается у кромки башмака, обращенной к области сварки. Укорочение размера b башмака также неравномерно: 0,0112...0,0131 мм (угол затяжки 83 °) (рис. 9, *в*), и 0,00483...0,00965 мм (угол затяжки 75 °) (рис. 10, *в*). Меньшее укорочение размера b башмака наблюдается в средней по длине l части башмака.

Изменения габаритных размеров башмака лопатки в процессе сварки трением показаны на рис. 11–12. В процессе сварки трением, размеры

l , b уменьшаются, размер a увеличивается. Значения укорочения и удлинения габаритных размеров башмака зависят от силы затяжки и от направления движения верхней оснастки. С увеличением силы затяжки укорочения и удлинения увеличиваются. Когда направление движения верхней оснастки совпадает с продольной составляющей силы затяжки, наблюдается наибольшее укорочение размера l , оно неравномерно и при силе затяжки 75 кН составляет 0,01817...0,0934 мм (угол затяжки 83 °) (рис. 11, *а*), и 0,0241...0,0385 мм (угол затяжки 75 °) (рис. 12, *а*). Укорочение размера b башмака также неравномерно, максимальное значение при силе затяжки 75 кН составляет 0,0140 мм (угол затяжки 83 °) (рис. 11, *в*), и 0,00946 мм (угол затяжки 75°) (рис. 12, *в*).

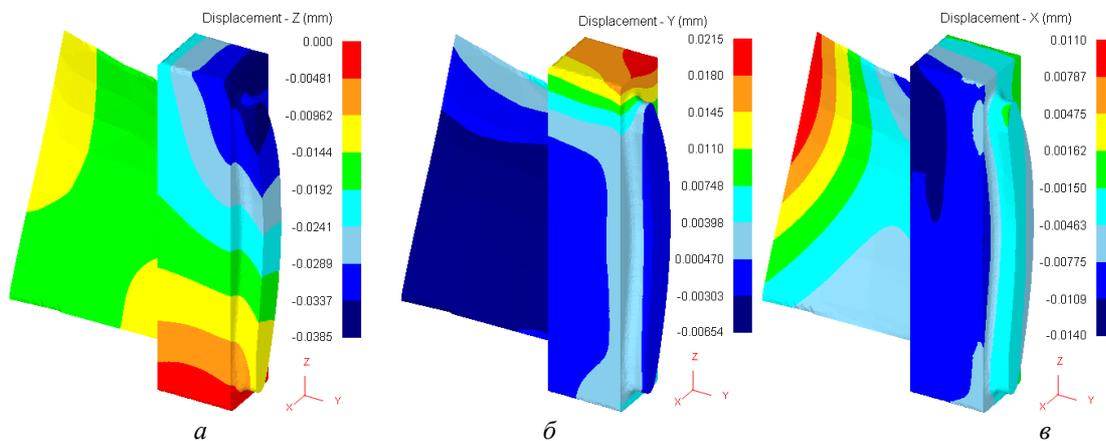


Рис. 11. Перемещения элементов при движении верхней оснастки влево (угол затяжки 83 °) силой затяжки 75 кН в направлении оси: *а* – OZ; *б* – OY; *в* – OX

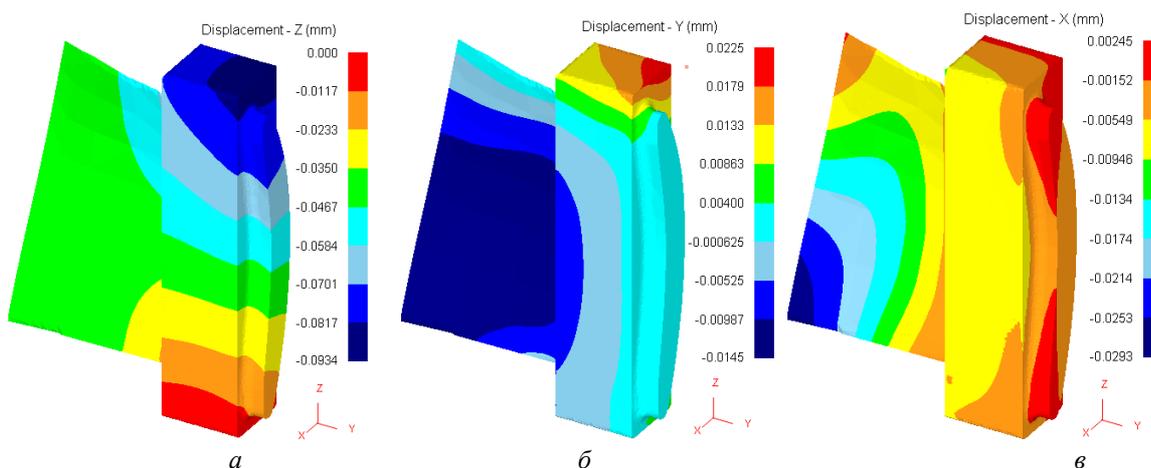


Рис. 12. Перемещения элементов при движении верхней оснастки влево (угол затяжки 75 °) силой затяжки 75 кН в направлении оси: *а* – OZ; *б* – OY; *в* – OX

Таблица 1

Изменение габаритных размеров башмака лопатки в момент зажатия лопатки в оснастке и в процессе сварки трением при угле затяжки 83°

Сила затяжки P , кН, направление движение верхней оснастки	ΔL , мм	ΔB , мм	ΔA , мм
45, зажатие	-0,0165	-0,00815	0,0150
	-0,124	-0,00698	0,00568
45, влево	-0,0282	-0,008	0,0227
	-0,0141	-0,00475	0,00146
45, вправо	-0,000575	-0,00806	0,0138
	0,00841	-0,00429	0,00326
60, зажатие	-0,220	-0,0109	0,0196
	-0,0165	-0,00930	0,00715
60, влево	-0,0330	-0,0109	0,0240
	-0,0165	-0,00713	0,00286
60, вправо	-0,00248	-0,0110	0,0156
	0,00771	-0,00651	0,0110
75, зажатие	-0,0247	-0,0131	0,0225
	-0,0216	-0,0112	0,00627
75, влево	-0,0385	-0,0140	0,0215
	-0,0241	-0,00775	0,000470
75, вправо	-0,00827	-0,0136	0,0144
	0,000005	-0,00970	0,00066

Таблица 2

Изменение габаритных размеров башмака лопатки в момент зажатия лопатки в оснастке и в процессе сварки трением при угле затяжки 75 °

Сила затяжки P , кН, направление движение верхней оснастки	ΔL , мм	ΔB , мм	ΔA , мм
45, зажатие	-0,0477	-0,00565	0,0000688
	-0,0417	-0,00283	0,0146
45, влево	-0,0589	-0,00618	0,000665
	-0,0442	-0,00162	-0,00390
45, вправо	-0,0290	-0,00611	0,0148
	-0,0208	-0,00151	-0,0000488
60, зажатие	-0,061	-0,00725	0,000225
	-0,0534	-0,00363	0,0191
60, влево	-0,0724	-0,00798	0,0247
	-0,0543	-0,00236	-0,000545
60, вправо	-0,0424	-0,00822	0,0162
	-0,0313	-0,00339	-0,000157
75, зажатие	-0,0818	-0,00965	0,0000375
	-0,0716	-0,00483	0,0246
75, влево	-0,0934	-0,00946	0,0225
	-0,0817	-0,00549	-0,000625
75, вправо	-0,0622	-0,00922	0,0142
	-0,0544	-0,00422	-0,000775

Сводные данные изменений размеров башмака лопатки в процессе сварки трением приведены в табл. 1–2. Из таблиц видно, что размер a незначительно увеличивается при всех значениях силы затяжки и всех направлениях движения верхней оснастки.

Полученные результаты не противоречат существующим опубликованным представлениям о процессах, протекающих при линейной сварке трением в титановых сплавах.

ВЫВОДЫ

Исследованиями установлено, что для данных размеров башмака лопатки оптимальным углом затяжки инструмента, обеспечивающим минимальные изменения размеров башмака лопатки, является угол 83 °.

Исследованиями установлено, что башмак лопатки при предварительной затяжке силой 45–75 кН и угле 83 ° в процессе линейной сварки трением находится в упругом состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lutjering G., Williams J. C.** Titanium. Springer – Verlag 2007. 479 p.
2. Лицензия Р. С. SFTS. Key #9190/ Ufa, Russia.
3. ГОСТ 19807-91: Титановый сплав ВТ-6.
4. **Ralph E. Patsfall.** Method for bonding an article projection/ US 4883216 B23P 1502. General Electric Company Заявлен: 28 мар 1988. Выдан: 28 ноя 1989.
5. **Trask R. D., Goetschius S. H., Hilton S. A.** Process for linear friction welding. US5865364 B23K20/12; F01D5/30. UNITED TECHNOLOGIES CORP [US] Заявлен: 24 дек 1996. Опубликовано: 1999-02-02.
6. **Andr-Claude-Flix Collot, Jean-Pierre Ferte.** Blade maintenance tool, and its application to friction welding of blades. US 6595401. B23K/3704; B23K/2012; B23Q/306; B25B/514 Andr-Claude-Flix Collot, Jean-Pierre Ferte SNECMA MOTEURS SA - FR. N 0015891; заявл. 07.12.2000; опубл. 14.06.2002
7. **Зянгиров Б. В., Медведев А. Ю.** Исследование остаточных напряжений создаваемых зажатием деталей в оснастке для приварки лопаток к диску методом линейной сварки трением // Мавлютовские чтения: сб. тр. Российск. науч.-техн. конф. Т. 3. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 103–107.

ОБ АВТОРАХ

Боткин Александр Васильевич, доцент, зам зав. каф. нанотехнологий. Дипл. инженер по обработке металлов давлением (УАИ, 1986). Канд. техн. наук (1992). Иссл. в обл. микроструктуры, металлов и сплавов, пластической деформации, мех. свойств, разрушения, моделирования.

Вареник Елена Владимировна, инженер 2 кат., той же каф. Дипл. инженер по обработке металлов давлением (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. микроструктуры, металлов и сплавов, пластическ. деформации, мех. свойств, разрушения, моделирования.

Ардуанова Дилара Данилевна, студ. Иссл. в обл. микроструктуры, металлов и сплавов, пластическ. деформации, мех. свойств, разрушения, моделирования.

Саморуков Григорий Викторович, студ. Иссл. в обл. микроструктуры, металлов и сплавов, пластическ. деформации, мех. свойств, разрушения, моделирования.