

Е. Е. Тарасенко, А. Ю. Медведев, В. М. Бычков,  
Е. Н. Малахов, В. В. Постнов

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЗАГОТОВКИ ЛОПАТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЛИСКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Рассмотрена проблема обеспечения технологичности конструкции заготовки лопатки для линейной сварки трением. Проведен анализ существующих вариантов конструктивного исполнения заготовки лопатки на технологичность. С помощью метода конечно-элементного моделирования была установлена взаимосвязь между формой напуска и напряженно-деформированным состоянием заготовки лопатки в процессе ЛСТ, предложена более технологичная конструкция заготовки лопатки для линейной сварки трением. *Линейная сварка трением; блиск; лопатка; технологичность*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведущими двигателестроительными предприятиями России осваиваются технологии изготовления двигателя пятого поколения, составной частью которого является «блиск» (от английского blisk = blades (лопатки) + disk (диск)). Изготовление блисков выполняют с применением линейной сварки трением. Для обеспечения возможности зажатия заготовки лопатки в оснастку на ней выполняют напуск. Чтобы обеспечить зажатие лопатки без напуска, необходима оснастка сложной геометрии и большие усилия зажатия для удержания лопатки за счет силы трения, которые могут нарушить геометрию пера в процессе сварки. Лопатку без технологического напуска также сложно точно базировать в сварочной оснастке ввиду сложности геометрии пера, в то время как напуск позволяет это сделать проще и точнее.

Существующий вариант конструктивного оформления напуска нетехнологичен с точки зрения сложности изготовления базирующих

поверхностей механической обработкой. Плоскость приложения усилия осадки сопряжена с поверхностью профиля пера лопатки, который имеет угол закрутки, поэтому, для получения этой плоскости необходима 5-осевая обработка. Такой вид обработки имеет ряд требований и относительных недостатков по сравнению с 3-осевой обработкой:

- более дорогостоящее станочное оборудование;
- требуется более квалифицированный обслуживающий персонал для наладки оборудования;
- создание управляющей программы для 5-осевой обработки на станочном оборудовании является более трудоемким;
- значительно большее время на обработку;
- сравнительно меньшая точность, вследствие использования большего количества исполнительных органов станка.

В таблице приведены технологические переходы обработки поверхности приложения усилия осадки для существующей заготовки лопатки и заготовки лопатки с горизонтальным буртом. Схемы обработки и составы исполнительных движений наглядно показывают сложность получения вышеуказанной поверхности в случае 5-осевой обработки. Так в первом случае (табл., а) в состав формообразующих исполнительных входят 6 движений, когда во втором случае (табл., б) их всего 2.

Предлагаемая конструкция заготовки лопатки с горизонтальным буртом (рис. 1), по срав-

---

Контактная информация: 8-919-14-15-689

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»

нению с существующей, является более технологичной. При такой конструкции для получения плоскости приложения усилия осадки достаточно 3-осевой обработки. Это позволяет на порядок сократить время обработки данной поверхности, снизить затраты на оборудование, обслуживающий персонал станков, получить более ровную поверхность, а значит, более точную базу для последующей операции ЛСТ, что повысит качество блиска в целом.

Трехмерная математическая модель заготовки лопатки была выполнена в соответствии с чертежом существующей лопатки, в нижней части напуска по двум длинным сторонам выполнены горизонтальные бурты. Для оценки влияния конструкции заготовки на ее напряженно-деформированное состояние рассматривалось три варианта конструктивного оформления напуска: с буртом высотой  $A = 1$  мм, 3 мм, 8 мм (рис. 1).

Ширина бурта 1,5 мм является максимально возможной, так как ее увеличение приведет либо к заходу инструмента в область пера лопатки, либо к увеличению ширины напуска, что

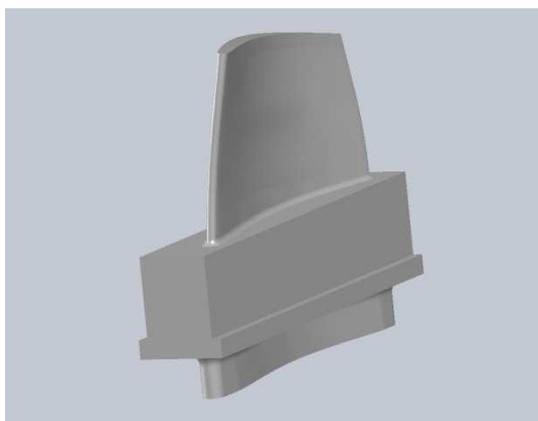
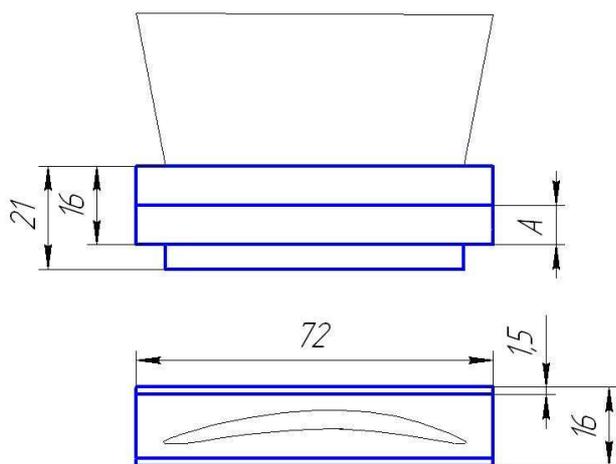
недопустимо ввиду того, что блиск имеет ограниченное межлопаточное расстояние.

В процессе моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки лопатки при ЛСТ к напуску в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 2, отдельно прикладывались усилия осадки и зажатия с целью выявления влияния каждой из составляющих на напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе сварки. Усилие зажатия принималось равным усилию осадки:  $P_{\text{зажатия}} = P_{\text{осад.}} = 40$  кН.

Лопатки блиска изготавливаются из титанового сплава ВТ6, поэтому в расчете использовались данные о наиболее близком его аналоге – Ti 6Al-4V [70–1850 F (20–1000) °C], в исходном состоянии являющимся изотропным, без начальных напряжений и деформаций. Предел текучести Ti 6Al-4V [70–1850 F (20–1000) °C] при 20 °C составляет 1172 МПа. Заготовка лопатки принималась упругим объектом.

**Технологические переходы механической обработки плоскости приложения усилия осадки при ЛСТ для существующей конструкции заготовки лопатки (а) и конструкции заготовки лопатки с буртами (б)**

Схема обработки	Состав исполнительных движений
<p style="text-align: center;"><i>a</i></p>	<p><math>\Phi_V(B_1), \Phi_{S1}(P_2), \Phi_{S2}(P_3), \Phi_{S3}(P_4), \Phi_{S4}(B_5), \Phi_{S5}(B_6), H_1(P_2), H_2(P_3), H_3(P_4), H_4(B_5), H_5(B_6)</math>,                      где <math>B_1</math> – вращение инструмента,  <math>P_2, P_3, P_4</math> – поступательные движения исполнительных органов по направляющим станка,  <math>B_5</math> – вращение заготовки,  <math>B_6</math> – поворот инструмента,  <math>\Phi_V(B_1), \Phi_{S1}(P_2), \Phi_{S2}(P_3), \Phi_{S3}(P_4), \Phi_{S4}(B_5), \Phi_{S5}(B_6)</math> – формообразующие исполнительные движения,  <math>H_1(P_2), H_2(P_3), H_3(P_4), H_4(B_5), H_5(B_6)</math> – наладочные движения подвода / отвода инструмента</p>
<p style="text-align: center;"><i>б</i></p>	<p><math>\Phi_V(B_1), \Phi_S(P_3), H_1(P_2), H_2(P_3), H_2(P_4)</math>,                      где <math>B_1</math> – вращение инструмента,  <math>P_2, P_3, P_4</math> – поступательные движения исполнительных органов по направляющим станка,  <math>\Phi_V(B_1), \Phi_S(P_3)</math> – формообразующие исполнительные движения,  <math>H_1(P_2), H_2(P_3), H_2(P_4)</math> – наладочные движения подвода/отвода инструмента</p>

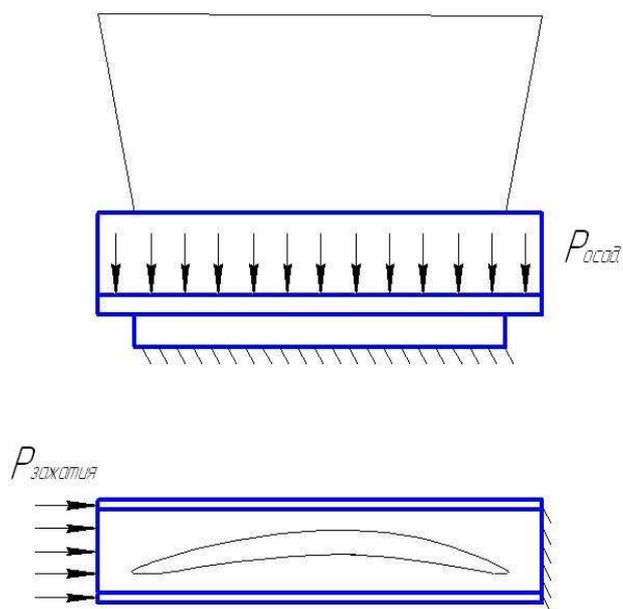


**Рис. 1.** Заготовка лопатки с горизонтальными буртами

Результаты моделирования нагружения заготовки усилием осадки представлены на рис. 3. Видно, что форма бурта влияет на напряженно-деформированное состояние заготовки. Так, для бурта высотой 1 мм максимальные напряжения в направлении оси  $Z$  при нагружении усилием осадки составляют  $\sim 150..230$  МПа (рис. 3, б), а максимальные перемещения в этом же направлении – порядка 0,1 мм (рис. 3, а). Те же значения для буртов высотой 3 и 8 мм составляют  $\sim 0,025$  мм (рис. 3, в), 200..250 МПа (рис. 3, г) и 0,025 мм (рис. 3, д), 150..200 МПа (рис. 3, е) соответственно. Это связано с тем, что с увеличением высоты консольно нагружаемого бурта при неизменной ширине повышается его жесткость.

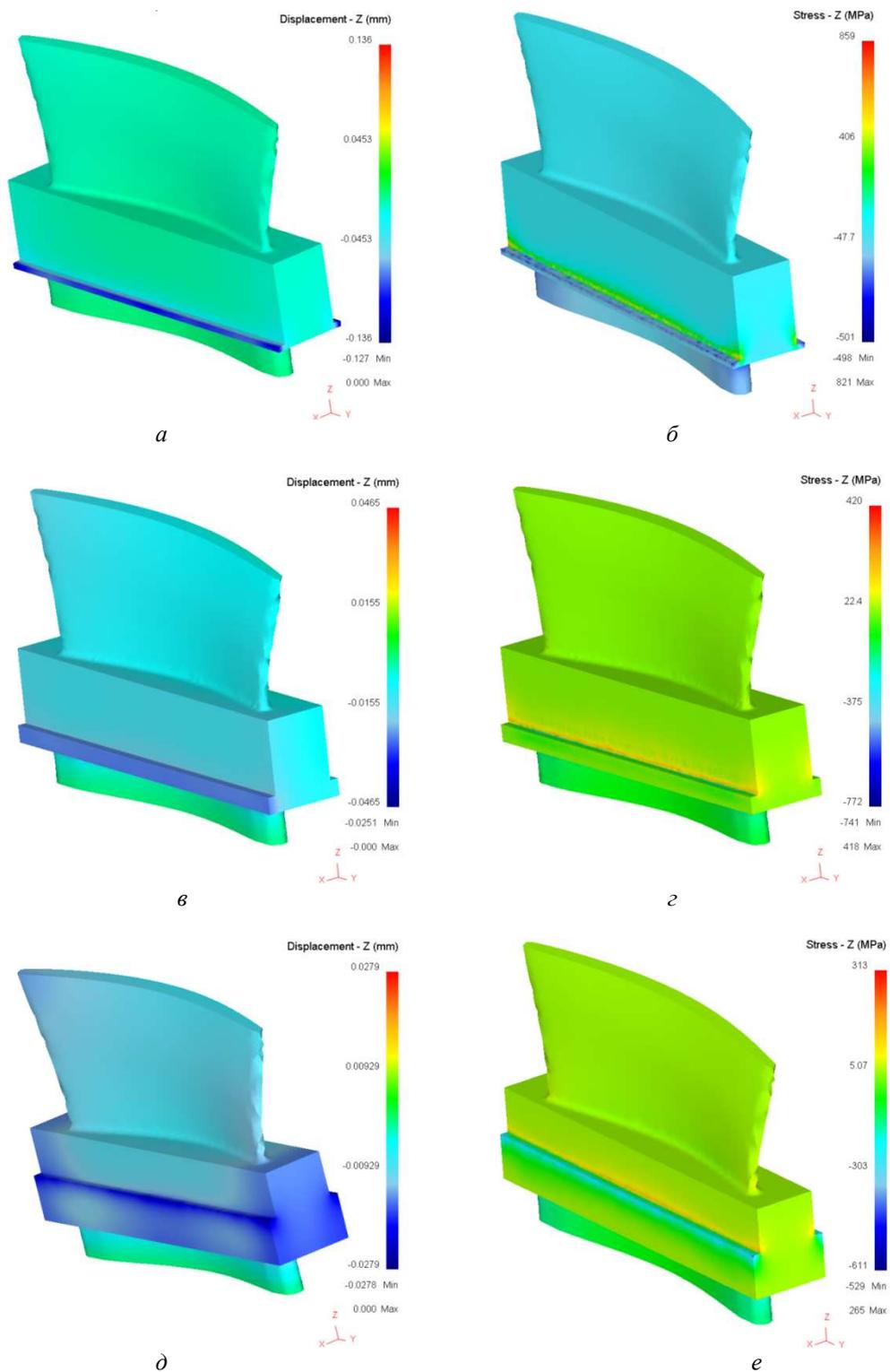
Одним из технологических параметров линейной сварки трением является величина осад-

ки (величина укорочения деталей в процессе сварки), которая контролируется датчиками сварочной машины с точностью до сотых долей миллиметра. Чем больше величина перемещения поверхности приложения усилия осадки, тем менее точными будут данные о реальной осадке, что приведет к несоблюдению параметров режима и отрицательно скажется на качестве изделия. С этой точки зрения из трех рассмотренных вариантов конструктивного исполнения напуска наиболее технологичным является напуск с буртом высотой 8 мм, так как он испытывает минимальные перемещения от приложенного усилия осадки.

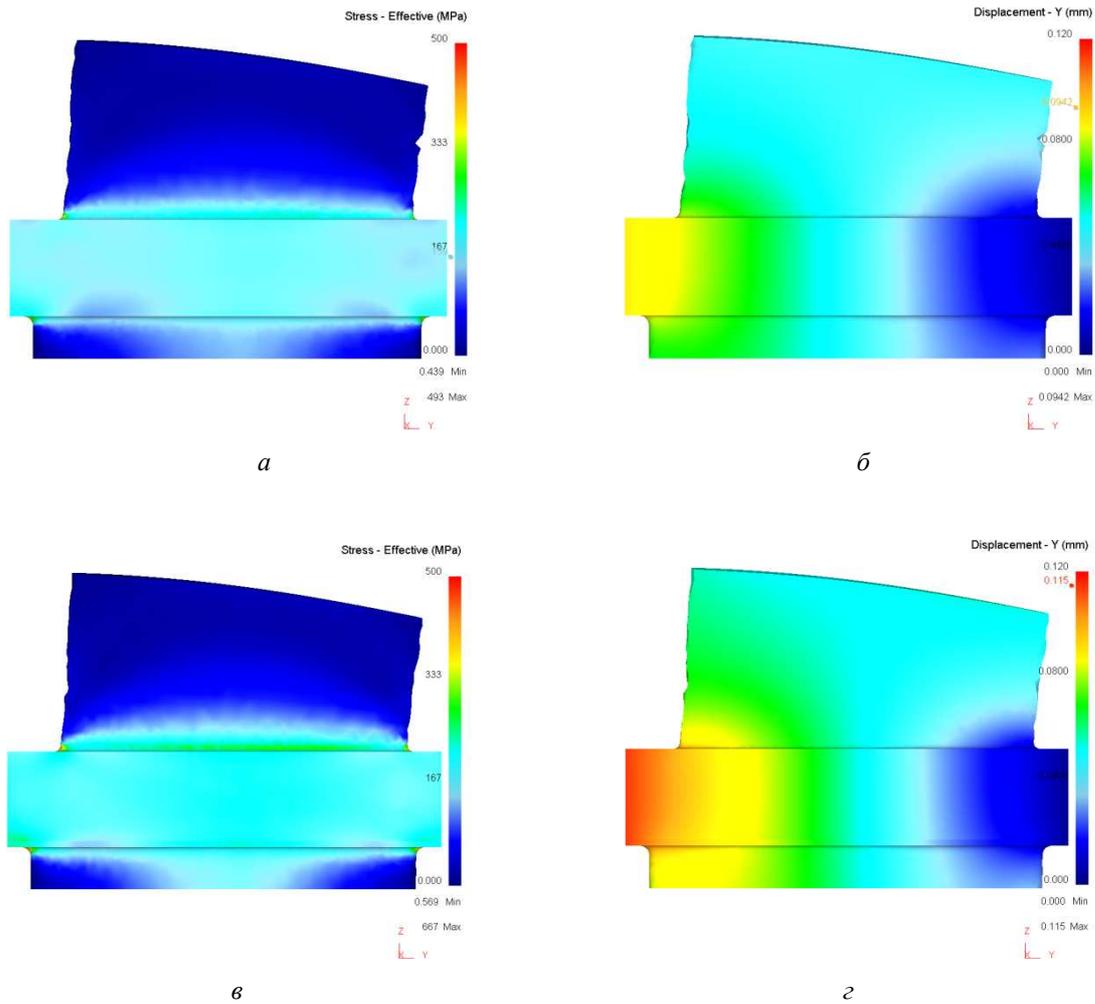


**Рис. 2.** Схема нагружения заготовки лопатки в процессе моделирования

Результаты моделирования нагружения заготовки усилием зажатия представлены на рис. 4. Высота бурта в данном случае не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние заготовки. Так, максимальные значения возникающих деформаций в направлении приложения усилия зажатия имеют величину  $0,1 \pm 0,01$  мм во всех трех рассмотренных случаях.



**Рис. 3.** Распределение перемещений узлов заготовки лопатки под действием усилия осадки (*a*, *в*, *д*); распределение напряжений, направленных параллельно усилию осадки (*б*, *з*, *е*)



**Рис. 1.** Распределение напряжений по поверхности заготовки лопатки и деформация заготовки в направлении приложения усилия зажатия для заготовки без бурта (*а, б*) и с буртом высотой 1 мм (*в, г*)

При зажатии лопатки в оснастке среднее значение эффективных напряжений, испытываемых технологическим напуском, составляет примерно 150...200 МПа для заготовок с буртами высотой 1, 3 и 8 мм, напряжения такой же величины возникают в напуске без буртов.

## ВЫВОДЫ

1. По результатам анализа напряженно-деформированного состояния заготовок лопатки для ЛСТ установлено, что высота бурта, выполненного на длинных сторонах напуска и воспринимающего усилие осадки, не оказывает существенного влияния на деформации и напряжения, возникающие под действием усилия зажатия, но с увеличением высоты бурта уменьшаются его деформации, возникающие под действием усилия осадки, следовательно, повышается точность регистрации сварочной

машиной усилия осадки и качество изделия. Отсюда, для рассматриваемого типоразмера изделия бурт высотой менее 3 мм является недопустимым, так как под воздействием усилия осадки в нем возникают неприемлемо большие деформации, направленные в сторону приложения  $P_{осад.}$ , приводящие к неточной оценке величины осадки в процессе ЛСТ.

2. Конструкция заготовки лопатки с параллельными буртами является более технологичной с точки зрения механической обработки, чем заготовка с поверхностью базирования, сопряженной с пером лопатки, поскольку обеспечивает меньшую деформацию заготовки в направлении осадки и большую точность регистрации сварочной машины величины осадки.

**ОБ АВТОРАХ**

**Тарасенко Евгений Евгеньевич**, мл. науч. сотр. каф. оборудования и технологии сварочн. производства. Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. напряженно-деформированного состояния деталей и элементов оснастки в процессе линейной сварки трением.

**Медведев Александр Юрьевич**, доц. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Гольятинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделирования нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

**Бычков Владимир Михайлович**, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Уральск. политехн. ин-т, 1980). Иссл. в обл. физики и техники дугowych и плазменных процессов в сварочном производстве.

**Малахов Евгений Николаевич**, асп. каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инженер по мехатронике (УГАТУ, 2009). Иссл. в области диссипации энергетических потоков при лезвийной обработке.

**Постнов Владимир Валентинович**, зав. той же каф. Дипл. инженер (УГАТУ, 1972). Д-р техн. наук по технологии и оборудованию мех. и физ. технологическ. обработки (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. нестационарных процессов резания жаропрочных сталей и сплавов.