

УДК 62-965: 539.5: 657.478.5:621.791.725

doi: 10.32620/aktt.2020.7.11

Е. В. ВИШНЕПОЛЬСКИЙ, Д. В. ПАВЛЕНКО, Я. В. ДВИРНЫЙ

Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ЭФФЕКТЫ УПРОЧНЕНИЯ АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ ДЕТАЛЕЙ ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

Выполнен анализ возможности расширения сферы использования технологии селективного лазерного спекания, для производства деталей короткоресурсных газотурбинных двигателей летательных аппаратов, за счет упрочнения мест концентрации напряжений локальным пластическим деформированием алмазным выглаживанием. Рассмотрены технические, экономические и социальные эффекты от применения данной технологии.

Проведен расчет и исследование напряженно-деформированного состояния сложнопрофильных тонкостенных деталей типа диск и моноколесо короткоресурсного двигателя летательного аппарата при их изготовлении по традиционной технологии из компактных материалов BT8 и INCONEL 718 и по альтернативной технологии из материалов Ti45Al3Nb (SLS) и INCONEL 718 (SLS). Выполнен анализ полей напряжений в зонах концентрации напряжений. Получены оценки запасов статической прочности указанных деталей при расслоении и разрыве силовых слоев. Выполнено сравнение полученных запасов статической прочности для различных мест концентрации напряжений деталей, выполненных из компактных и некомпактных материалов.

Эффективность применения альтернативной технологии, оценена путем расчета удельной себестоимости продукции в условиях серийного производства при программе выпуска 1000 шт. Выполнена оценка экономического эффекта от использования технологии селективного лазерного спекания и упрочнения при производстве детали диск из некомпактного материала INCONEL 718 (СЛС) в сравнении с базовой технологией при получении детали из компактного материала INCONEL 718 в условиях серийного производства. Проведено сравнение необходимых капитальных вложений для базовой и альтернативной технологии. Выполнена оценка влияния альтернативной технологии на социальную и экологическую сферу жизнедеятельности человека.

Сделаны выводы о перспективах внедрения технологии локального пластического деформирования алмазным выглаживанием для расширения сферы использования СЛС при производстве деталей для отечественной авиационной и авиационно-космической отрасли промышленности и общества, а также о ее потенциале для других отраслей.

Ключевые слова: некомпактные материалы; селективное лазерное спекание; алмазное выглаживание; запас статической прочности; себестоимость; капитальные вложения.

Введение

Современное машиностроение развивается в условиях сильнейшей экономической и технической конкуренции. Одной из основных особенностей которой являются изготовление деталей небольшими партиями и снижение временного промежутка от разработки нового изделия до его серийного производства. Использование для этого традиционных методов получения заготовок и обработки резанием сопровождается значительными трудностями и затратами. В настоящее время используемые для этого методы и технологии постоянно совершенствуются. К таким усовершенствованиям можно отнести прогрессивные методы получения заготовок, применение многокоординатных обрабатывающих центров, комбинированного режущего инструмента и многое другое. Однако, эти изменения воздействуют

только на некоторые этапы производственного процесса, не меняя его в целом.

Появление в 80-х годах аддитивных технологий, в настоящее время совершило переворот в сферах машиностроения, строительства, медицины и многих других. Повышенный интерес, к которым связан прежде всего в значительном сокращении времени между разработкой нового изделия и запуском его в производство. Не маловажным фактором является снижение вспомогательных затрат на производство изделия связанных с оснасткой, наладкой оборудования и инструментальным обеспечением [1, 2]. Уже сейчас перед учеными и инженерами открываются уникальные возможности по разработке материалов заданными физико-механическими характеристиками, получение которых ранее было невозможно. Значительно расширяется сфера применения композиционных, порошко-

вых и металлокерамических материалов. Применение данных технологий при мелко- и среднесерийном производстве позволяет значительно снизить потери материала при производстве, дает возможность изготовления тонкостенных деталей сложной геометрической формы с заданной точностью и минимальной последующей обработкой. Аддитивные технологии позволяют получать детали, созданные в виртуальной среде на основании оптимизированной формы, что позволяет значительно уменьшить ее вес не снижая прочности. Применение аддитивных технологий позволит решить так называемое противостояние технологов и конструкторов, поскольку в данном случае их роли может выполнять один человек [3, 4].

Аддитивные технологии на сегодняшний момент находятся на ранней стадии своего развития и открывают для исследователей большое поле для деятельности. При их практическом применении возникает большое количество нерешенных проблем. Среди которых: высокая стоимость порошка и установок для аддитивного производства, сложности связанные непосредственно с процессом изготовления изделий, необходимость наличия специальной атмосферы в зоне сплавления порошка, невысокая производительность, невысокое качество поверхностного слоя вследствие разницы температур между переплавленным и не переплавленным порошком и много другое [5, 6]. Однако все перечисленные вопросы в некотором роде можно назвать «молодыми болезнями» характерными для любой новой технологии, только внедряемой в производство.

Одной из самых распространенных аддитивных технологий в авиационном и космическом машиностроении является селективное лазерное спекание (СЛС). Технология была разработана Карлом Деккардом и Джо Биманом в конце 80-х годов и в 2014 году стала общедоступной. Деталь создается в следующей последовательности: на поверхность подложки подается слой порошка и равномерно распределяется с помощью специального ролика; лазер на основании сечения заданного виртуальной моделью выполняет спекание порошка; после этого основание опускается на толщину наносимого слоя; указанная последовательность выполняется необходимое для получения изделия количество раз; оставшийся после получения детали порошок просеивается для удаления некондиционного несплавленного порошка; готовое изделие отделяется от подложки механическим путем [7, 8]. Принципиальная схема СЛС показана на рисунке 1.

Принципиальным преимуществом данной технологии в сравнении с другими аддитивными технологиями является то, что для построения сложно-

профильных деталей нет необходимости в поддерживающей структуре, поскольку в этой роли выступает сам порошок. При печати детали вследствие равномерного охлаждения расплавленного порошка значительно снижается степень деформирования моделей и напряжения, возникающие вследствие неравномерного охлаждения.

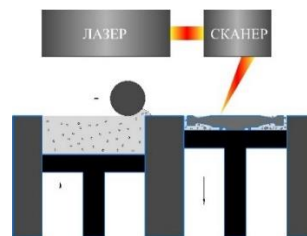


Рис. 1. Принципиальная схема селективного лазерного спекания

Большое влияние на параметры детали, получаемой по технологии СЛС, будет оказывать параметры используемого порошка, его свойствами, размером формой и многими другими факторами. Также недостатками аддитивных технологий и прежде всего селективного лазерного спекания можно отнести: высокую шероховатость поверхности; пористость образцов; сложности при формировании первого слоя порошка, необходимость в чистке рабочей камеры и просеивания оставшегося порошка для дальнейшего использования; риски для рабочего связанной с применением мелкодисперсного порошка.

Наличие остаточной пористости значительно снижает прочностные характеристики и может привести к появлению трещин в местах концентрации напряжений. Решить указанную проблему поможет применение для упрочнения мест концентрации напряжений одного из методов локального пластического деформирования. Учитывая, что большинство изделий авиационной и космической техники состоят из деталей разных типоразмеров, а места концентрации напряжений обычно имеют небольшие габариты одной из актуальных технологий локального пластического деформирования будет алмазное выглаживание (АВ).

Одной из актуальных задач современного машиностроения в настоящее время является анализ напряженного состояния в местах концентрации напряжений сложнопрофильной детали, полученной по технологии СЛС с последующим алмазным выглаживанием. Большую актуальность и практическую ценность носит сравнение какое влияние на запас прочности сложнопрофильной детали будет иметь технология изготовления ее с помощью СЛС в сравнении с традиционной технологией. Огромную важность для более широкого применения СЛС

представляет изучение экономического эффекта от внедрения данной технологии в сравнении с традиционными. Особое значение приобретает вопрос нехватки данных, показывающих на примере конкретных деталей сравнение технических и экономических эффектов от использования СЛС+АВ и традиционных технологий их производства.

1. Постановка задачи

Целью настоящей работы являлось всесторонняя оценка эффектов от коммерческого применения технологии селективного лазерного сплавления с последующим упрочнение алмазным выглаживанием. Для ее достижения были решены задачи по классификации эффектов от применения новой технологии, их оценки, а также расчета себестоимости получения деталей. Объектом исследования являлись аспекты влияния реализации данной технологии на различные отрасли деятельности человека. Предметом исследования являлись влияние применения СЛС и АВ на статический запас прочности, себестоимость изготовления деталей по базовой и альтернативной технологии, необходимые капитальные вложения для реализации указанных технологий. Подробно технические аспекты исследуемой технологии СЛС+АВ описаны в работе [9]. Целью исследования является исследование технических и экономических эффектов от применения технологии

СЛС+АВ для производства диска и моноколеса короткоресурсного газотурбинного двигателя (ГТД) беспилотного летательного аппарата (рис. 2). Задачами исследования являются оценка запасов статической прочности и экономического эффекта при использовании для производства указанных деталей технологии АВ+СЛС.

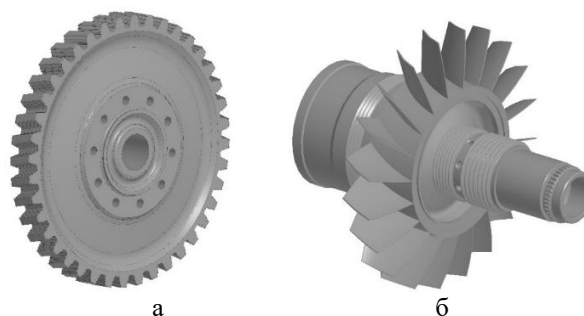


Рис. 2. Детали короткоресурсного газотурбинного двигателя беспилотного летательного аппарата:
а – диск; б – моноколесо

2. Материалы и методы исследования

Анализ материалов применяемых для изготовления исследуемых деталей по традиционной и альтернативной технологии показан в таблице 1.

Таблица 1

Традиционные и альтернативные материалы для производства деталей ГТД

Сплав	Описание	Достоинства	Недостатки
BT 8	Жаропрочный титановый сплав, применяемый для изготовления деталей, работающих при температуре до +450°C	Высокие прочностные и жаропрочные свойства, трещиностойкость.	Высокая стоимость, необходимость импорта, не свариваемый, невысокие технологические свойства.
Ti45Al3Nb (SLS)	Перспективный титановый сплав на основе алюминидов титана, получаемый селективным лазерным спеканием.	Низкий удельный вес; повышенные механические свойства; высокий уровень жаропрочности и жаростойкости.	Низкая пластичность, вязкость, низкая обрабатываемость, чувствительность к поверхностным дефектам, остаточная пористость, высокая стоимость порошка.
INCONEL 718	Жаропрочный высококачественный сплав, обладающий повышенной коррозионной стойкостью.	Высокая прочность и коррозионная стойкость, хорошая свариваемость, хорошее сопротивление ползучести, высокие механических свойств при повышенной температуре.	Низкая обрабатываемость давлением, высокая склонность к наклепу, сложность механической обработки.
INCONEL 718 (SLS)	Сплав, получаемый селективным лазерным спеканием.	Низкий удельный вес, заданные механические свойства за счет варьирования параметров печати.	Высокая стоимость порошка, равнопрочность, высокая склонность к наклепу, сложность механической обработки.

Традиционные сплавы BT8 и INCONEL718 (отечественный аналог ЭП718) анализ которых представлен в таблице 1 являются одними из самых распространенных в авиационной и ракетно-космической технике. Материалы предлагаемые в качестве альтернативы обладают более высокими характеристиками при меньшем весе, несмотря на более высокую стоимость их применение является рациональным вследствие значительной экономии веса детали при изготовлении ее методом СЛС. Механические и физические свойства материалов показаны в таблице 2.

Оценка технического эффекта выполнялась на основании оценки статического запаса прочности полученного на основании анализа напряженно-деформируемого состояния (НДС) по методу конечных элементов (МКЭ) исследуемых деталей. Геометрические модели диска и моноколеса были выполнены в системе АСКОН КОМПАС и импортированы в программный комплекс ANSYS WORKBENCH с помощью формата IGES. Для построения сетки конечных элементов использовали объемный конечный элемент SOLID 186 (двадцати узловой гексагональный). Ввиду сложной геометрии исследуемых деталей было выполнено сгущение расчетной сетки в местах предполагаемой концентрации напряжений.

Оценка экономического эффекта выполнялась на основании расчета себестоимости и величины капитальных вложений для традиционной и альтернативной технологии производства детали «Диск» в условиях среднесерийного производства при программе выпуска 1000 шт.

3. Результаты исследований и их анализ

Сопоставление результатов численного расчета НДС для моделей деталей «Диск» и «Моноколесо» выполненными из традиционных материалов с деталями, выполненными из некомпактных материалов с помощью СЛС и последующего упрочнения алмазным выглаживанием позволяют оценить степень влияния различных материалов и технологий изготовления на статическую прочность данных деталей. Анализ влияния алмазного выглаживания на изменение запасов статической прочности для раз-

ных материалов выполняли в следующей последовательности: построение модели пригодной для МКЭ; задание свойств материала; разбиение модели на сетку конечных элементов; приложение к модели граничных условий; численное решение. На рисунке 3 показана конечно-элементная сетка исследуемых деталей. На рисунке 4 показаны места, в которых выполнялось измерение напряжений, возникающих от приложенных нагрузок при заданных ограничениях перемещений.

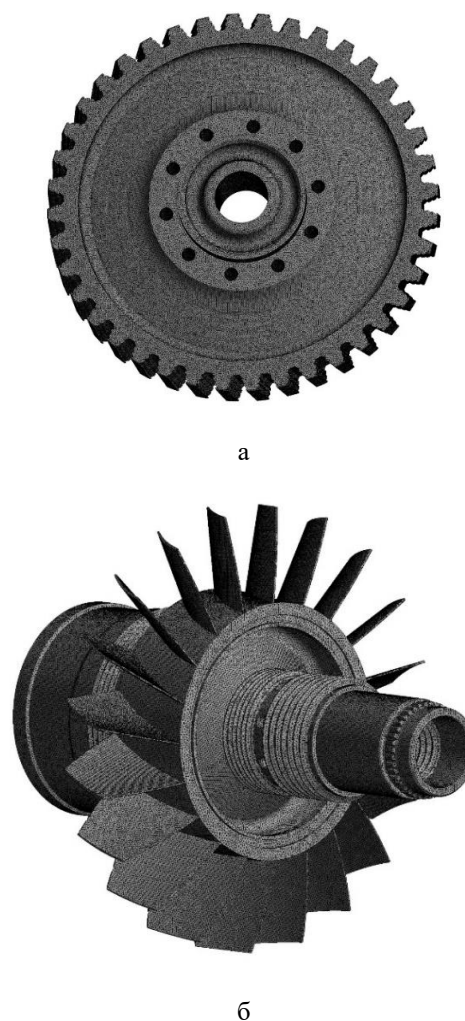


Рис. 3. Геометрически полные модели с разбивкой на сетку конечных элементов:
а – диск; б – моноколесо

Таблица 2

Свойства традиционных и альтернативных материалов для производства деталей ГТД [10, 11]

Сплав	E, МПа	ρ , кг/м ³	$\sigma_{0,2}$, МПа	μ	δ , %
BT 8	$1,2 \times 10^5$	4520	985	0,3	10
Ti45Al3Nb (SLS)	$0,95 \times 10^5$	4200	1000	0,3	5
INCONEL 718	2×10^5	8190	1000	0,29	24
INCONEL 718 SLS	$1,13 \times 10^5$	7940	1200	0,278	21

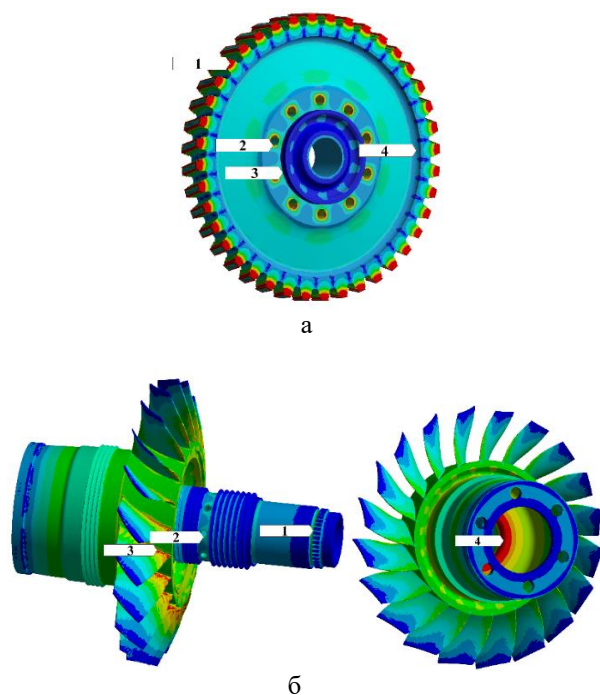


Рис. 4. Геометрически полные модели с разбивкой на сетку конечных элементов:
а – диск; б – моноколесо

Из результатов расчета НДС деталей получено, что высокие напряжения возникают не только в области елочного паза (рис. 3, а) и начала лопаток (рис. 3, б), но и в других местах концентрации напряжений. Для адекватной оценки надежности детали необходимо учитывать напряженное состояние во всех местах высокой концентрации напряжений. И если прочности лопаток и елочного паза дисков уделяется много внимания, то вопросы прочности других концентраторов напряжений практически не исследуются.

Важной задачей оценки надежности детали является изучения величины запаса статической прочности в разных конструктивных концентраторах напряжений. Расчет запаса статической прочности сводится к сопоставлению максимальных напряжений, возникающих в местах их концентрации с пределом текучести в качестве допускаемой нормативной величины

$$n = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\max}},$$

где n – запас статической прочности;

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа;

$\sigma_{\max}$ – максимальные напряжения в месте измерения, МПа.

Данные результатов измерения изменения запаса статической прочности от применения различных материалов и технологий изготовления деталей «Диск» и «Моноколесо» показаны в таблице 3.

Как видно из данных таблицы 3 применение для производства деталей короткоресурсного двигателя летательного аппарата некомпактных материалов и последующего локального пластического деформирования алмазным выглаживанием мест концентрации напряжений позволяет значительно снизить их величину и повысить запас статической прочности. Причем подобный результат наблюдается для различных мест концентрации напряжений.

Как уже говорилось ранее одним из факторов мешающих более широкому внедрению аддитивных технологий является кажущаяся высокая величина первоначальных капитальных вложений в производство, однако крайне мало данных, подтверждающих это на конкретных примерах.

Таблица 3

Статический запас прочности при использовании разных материалов

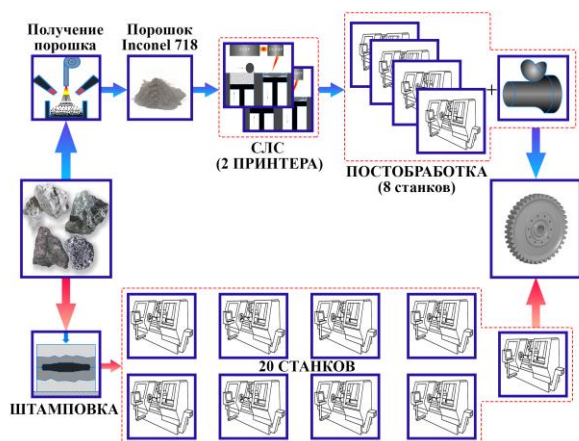
Деталь	Место измерения							
	1		2		3		4	
	$\sigma_{\max}$, МПа	n	$\sigma_{\max}$, МПа	n	$\sigma_{\max}$, МПа	n	$\sigma_{\max}$, МПа	n
ДИСК								
BT 8	121,4	8,11	85,1	11,57	249,4	3,95	255,2	3,86
Ti45Al3Nb (SLS)	100,1	10,0	83,4	11,2	238,5	4,2	247,3	4,04
Ti45Al3Nb (SLS)+AB	82,8	12,1	80,5	12,42	217,4	4,6	241,3	4,14
МОНОКОЛЕСО								
INCONEL 718	574,9	1,74	405,0	2,47	141,3	7,08	62,2	16,1
INCONEL 718 (SLS)	510,0	2,35	376,9	3,18	124,3	9,65	58,2	20,62
INCONEL 718 (SLS)+AB	469,5	2,57	361,8	3,32	119,4	10,5	55,9	21,47

Выполним оценку эффективности и рациональности применения некомпактного материала INCONEL 718 для изготовления детали «Диск» методом СЛС и последующего упрочнения алмазным выглаживанием мест концентрации напряжений. Для этого выполним расчет экономического эффекта и величины необходимых капитальных вложений для реализации указанных технологий в условиях серийного производства.

В традиционную технологию изготовления детали диск входит: получение заготовки одним из методов штамповки; операции обработки резанием; вспомогательные операции. Альтернативная технология заключается в следующем: СЛС детали; постобработка резанием.

Визуальное сравнение двух технологий производства заданной детали (рис. 5) упрощает оценку эффективности внедрения нового технологического процесса, что в свою очередь приведет к снижению себестоимости и повышению технических характеристик детали.

ПРОГРЕССИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ ДИСК



БАЗОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ ДИСК

Рис. 5. Сравнение традиционной и альтернативной технологии получения диска короткоресурсного ГТД для беспилотного летательного аппарата

Отсутствие необходимости в заготовительных операциях и необходимости изготовления полуфабрикатов для последующей штамповки значительно снижает риски, связанные с плано-подготовительным обеспечением. Значительно снижается объем механической обработки поверхностей. Меньшее количество металлообрабатывающего оборудования значительно снижает потребность в производственных площадях. Значительно снижается необходимое количество оборудования для производства задан-

ной детали согласно программе выпуска. Так для базового технологического процесса необходимо 20 станков, не считая заготовительного и вспомогательного оборудования, для альтернативного процесса необходимо всего 10 единиц оборудования.

Альтернативный технологический процесс и его отличие от базового показано на рисунке 6. Одной из особенностей предлагаемого технологического процесса является то что упрочнение алмазным выглаживанием мест концентрации напряжений выполняется на токарном обрабатывающем центре на последнем технологическом переходе токарной постобработки.

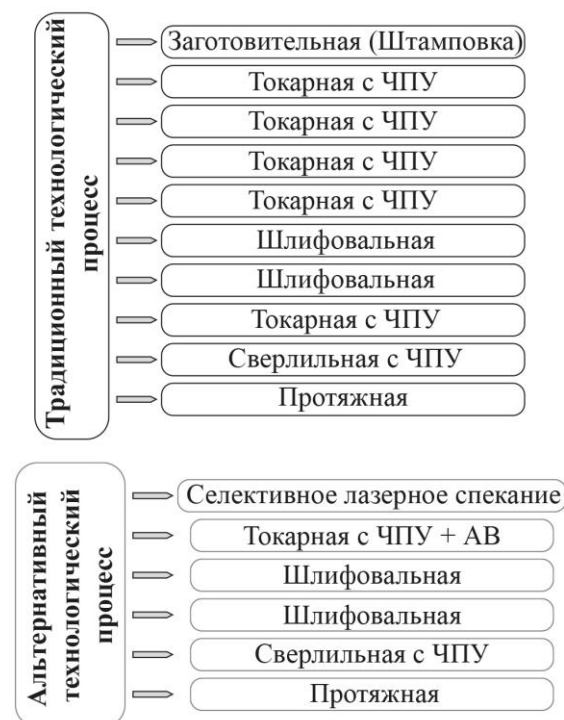


Рис. 6. Сравнение традиционной технологии производства детали «Диск» с альтернативной

Расчет технико-экономических показателей изготовления детали «Диск» выполняли с учетом стоимости оборудования, оснастки, инструмента, затрат электрической и других видов энергии. Стоимость полуфабрикатов для базового метода получения заготовки и порошка для селективного лазерного спекания бралась согласно розничным ценам на момент расчета.

Экономический эффект (табл. 4) рассчитывали исходя из сравнения себестоимости изготовления одной детали, произведенной по альтернативной технологии с базовой, а также необходимых капитальных вложений для обоих вариантов изготовления.

Таблица 4

Технико-экономические показатели изготовления детали «Диск»

Статья расходов	Базовый вариант		Альтернативный вариант	
	Всего, грн	На ед., грн	Всего, грн	На ед., грн
Капитальные вложения	25105241,25		24386902,87	
Основные материалы	4142110	4142,11	6771500	6771,5
Основная заработная плата основных рабочих	655210	655,21	355030	355,03
Дополнительная ЗП основных рабочих	262084	262,084	142012	14,01
Начисления на заработную плату	201804,68	201,804	173254,64	173,25
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	32211473,62	32211473,62	11452364,68	11452,36
Себестоимость	37472682,3	37472,68	18766150	18766,15
Расходы на реализацию	374726,82	374,73	1876615	187,66
Общая себестоимость	37847409,12	37847,41	18953810	18953,81
Прибыль 25%	9461852,28	9461,85	4738452,5	4738,45
Отпускная цена	47309261,4	47309,26	23692262,5	23692,26
НДС 20%	9461852,28	9461,85	4738452,5	4738,45
Цена реализации	56771113,68	56771,11	28430712,5	28430,7
	На единицу продукции		На программу выпуска	
Экономический эффект	28340,41		28340410	

Анализируя данные расчета технико-экономических показателей, прежде всего можно сделать вывод что альтернативная технология позволит значительно снизить затраты на производство исследуемой детали. Так себестоимость производства одной детали с учетом затрат реализации по базовой технологии 56771,11 грн, а по альтернативной 28430,7 грн.

Стоимость установки для селективного лазерного сплавления DMP FACTORY 500 6750000 грн, что значительно выше стоимости среднего станка с ЧПУ используемого в базовом технологическом процессе, однако за счет значительного снижения количества оборудования капитальные вложения необходимые для реализации указанного технологического процесса в сравнении с базовым также ниже.

Наряду с техническими и экономическими эффектами альтернативная технология позволяет получить позитивные экологические и социальные эффекты. Предлагаемый технологический процесс изготовления детали «Диск» оказывает большое влияние на социальную сферу производства, поскольку с одной стороны снижает требования к квалификации и количеству необходимого персонала, с другой стороны повышает требования к их специализации. Производство исследуемой детали по альтернативной технологии значительно снижает негативное влияние производства на экологию. Снижается количество отходов после механической обработки, которые потом необходимо переработать

или утилизировать. На альтернативную технологию необходимо меньше электроэнергии, а значит ее надо меньше вырабатывать. Данная технология требует гораздо меньше необходимость в производственных площадях, что также положительно влияет на экологию.

Висновки

Подробный анализ применения селективного лазерного спекания и упрочнения алмазным выглаживанием мест концентрации напряжений при производстве деталей короткоресурсных газотурбинных двигателей летательных аппаратов позволили оценить влияние указанных технологий на техническом, экономическом, экологическом и социальном уровнях.

Изучено влияние АВ мест концентрации напряжений на изменение запаса статической прочности при использовании компактных и некомпактных материалов. Установлено, что применение некомпактных материалов приводит к снижению максимальных напряжений, возникающих в местах их концентрации, последующее алмазное выглаживание еще сильнее усиливает данный эффект. Это можно объяснить более низким модулем упругости и пределом текучести для некомпактных материалов.

Установлено, что себестоимость изготовления детали «Диск» по базовому технологическому про-

цессу составляет 56771,11 грн, а по альтернативному 28430,7 грн.

Установлено, что необходимые капитальные вложения для внедрения альтернативной технологии 24386902,87 грн, чем затраты, при применении базовой технологии 25105241,25 грн.

Экономический эффект от внедрения технологии селективного лазерного спекания и упрочнения мест концентрации напряжений алмазным выглаживанием при изготовлении детали «Диск» в условиях серийного производства 28340,41 грн.

Перспективы дальнейших исследований лежат в плоскости детальной количественной оценки влияния рассматриваемой технологии на надежность деталей короткоресурсных двигателей летательных аппаратов.

Литература

1. Ахмедеев, М. В. Селективное лазерное спекание. Особенности применения [Текст] / М. В. Ахмедеев, И. А. Савин // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее, Курск, 17-18 октября 2018 г. – Курск, 2018. – С. 150-154.
2. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство [Текст] / О. Н. Гончарова и др. // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 (43). – С. 123.
3. Нефедова, Л. А. Управление серийным производством с использованием аддитивных технологий [Текст] / Л. А. Нефедова, С. Е. Калязина // Глобальный научный потенциал. – 2018. – № 12 (93). – С. 220-222.
4. Курынец, С. В. Аддитивные технологии – третья индустриальная революция [Текст] / С. В. Курынец, К. Ю. Нагулин, А. И. Горунев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 7 (61). – С. 39-44.
5. Чесодуров, А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения [Текст] / А. Н. Чесодуров // Известия Тульского государственного университета. – 2016. – № 8-2. – С. 210-217.
6. Малькова, Я. Ю. Перспективы развития аддитивных технологий [Текст] / Я. Ю. Малькова, А. П. Соколов // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, 23-25 мая 2019 г. – Томск, 2019. – С. 117-121.
7. Бабакова, Е. В. Селективное лазерное спекание (SLS) [Текст] / Е. В. Бабакова, А. О. Чудинова // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации, Курск, 19-21 марта 2014 г. – Курск, 2014. – С. 159 – 161.
8. Назаров, А. П. Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания [Текст] / А. П. Назаров, А. А. Окунькова //

Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 1 (67). – С. 76 – 83.

9. Вишненьский, Е. В. Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием [Текст] / Е. В. Вишненьский, Д. В. Павленко // Наука и техника. – 2019. – № 1. – С. 62-69.

10. Kenel, C. Development of oxide dispersion strengthened titanium aluminides for additive manufacturing [Text]: doctoral dissertation / Kenel Christoph. – ETH-Zürich, 2016. – 216 p. DOI: 10.3929/ethz-a-010860058

11. Структура и свойства образцов из сплава Inconel 718 полученных по технологии селективного лазерного плавления [Текст] / А. А. Педаш, Н. А. Лысенко, В. В. Клочихин и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 8 (143). – С. 46-54.

References

1. Akhmedeev, M. V., Savyn, Y.A. Selektivnoe lazernoe spe-kanye. Osobennosti prymeneniya [Selective laser sintering. Application Features]. Problemi i perspektivy razvityiya Rossyy: Molodezhnyi vzhlyad v budushchee, Kursk, 17-18 oktyabrya 2018 h. [Problems and Prospects for the Development of Russia: A Young Look at the Future, Kursk, October 17-18, 2018]. Kursk, 2018, pp. 150-154. (In Russian).
2. Honcharova, O. N., Berezhnoy, Yu. M. Bessarabov, E. N., Kadamov, E. A., Haynutdynov, T. M., Nahopet'yan, E. M., Kovyna, V. M., Addityvnye tekhnolohyy – dynamychno razvyvayushcheesya proyzvodstvo [Additive technologies - dynamically developing production]. Ynzhenernyi vestnyk Dona, 2016, no. 4 (43), pp. 123. (In Russian).
3. Nefedova, L. A., Kalyazina, S. E. Upravlenie seriinym proizvodstvom s ispol'zovaniem additivnykh tekhnologii [Additive technology batch management]. Global'nyi nauchnyi potentsial, 2018, no. 12 (93), pp. 220-222. (In Russian).
4. Kuryntsev, S. V., Nagulin, K. Yu., Gorunov, A. I. Additivnye tekhnologii – tret'ya industrial'naya revolyutsiya [Additive Technology - The Third Industrial Revolution]. Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii, 2016, no. 7 (61), pp. 39-44. (In Russian).
5. Chemodurov, A. N. Primenenie additivnykh tekhnologii v proizvodstve izdelii mashinostroeniya [The use of additive technologies in the manufacture of engineering products]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2016, no. 8-2, pp. 210-217. (In Russian).
6. Mal'kova, Ya. Yu., Sokolov, A. P. Perspektivy razvitiya ad-ditivnykh tekhnologii [Prospects for the development of additive technologies]. Innovatsionnye tekhnologii v mashi-nostroenii: sbornik trudov X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 23-25 maya 2019 g. [Innovative Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of the X International

al Scientific and Practical Conference, May 23-25, 2019]. Tomsk, 2019, pp. 117-121. (In Russian).

7. Babakova, E. V., Chudinova, A. O. Selekktivnoe lazernoe spekanie (SLS) [Selective Laser Sintering (SLS)]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii, Kursk, 19-21 marta 2014 g.* [Modern instrumental systems, information technologies and innovations, Kursk, March 19-21, 2014]. Kursk, 2014, pp. 159-161. (In Russian).

8. Nazarov, A. P., Okun'kova, A. A. Tipovye obraztsy izdelii, poluchaemykh metodom selektivnogo lazernogo spekaniya [Typical samples of products obtained by selective laser sintering]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1 (67), pp. 76-83. (In Russian).

9. Vishnepol'skii, E. V., Pavlenko, D. V. Effektivnost' uplotneniya nekompaktnykh splavov almaznym

vyglazhivaniem [The efficiency of compaction of non-compact alloys with diamond smoothing]. *Nauka i tekhnika*, 2019, no. 1, pp. 62-69. (In Russian).

10. Kenel, C. *Development of oxide dispersion strengthened titanium aluminides for additive manufacturing*. Doct. Diss. ETH-Zürich, 2016. 216 p. DOI: 10.3929/ethz-a-010860058.

11. Pedash, A. A., Lysenko, N. A., Klochikhin, V. V., Shilo, V. G. Struktura i svoystva obraz-tsov iz splava Inconel 718 poluchennykh po tekhnologii selektivnogo lazernogo plavlenniya [Structure and properties of samples from Inconel 718 alloy obtained by selective laser melting technology]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 8 (143), pp. 46-54. (In Russian).

Поступила в редакцию 28.05.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

ПРОГНОЗОВАНІ ЕФЕКТИ ЗМІЦНЕННЯ АЛМАЗНИМ ВИПАСОВУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ

Є. В. Вишнепольський, Д. В. Павленко, Я. В. Двірник

Виконаний аналіз можливості розширення сфери використання технології селективного лазерного спікання, для виробництва деталей короткоресурсних газотурбінних двигунів літальних апаратів, за рахунок зміцнення місць концентрації напружень локальною пластичною деформацією алмазним вигладжуванням. Розглянуті технічні, економічні і соціальні ефекти від застосування цієї технології.

Проведений розрахунок і дослідження напружено-деформованого стану складнопрофільних тонкостінних деталей типу диск і монокоесо короткоресурсного двигуна літального апарату при їх виготовленні за традиційною технологією з компактних матеріалів BT8 і INCONEL 718 і за альтернативною технологією з матеріалів Ti45Al3Nb(SLS) і INCONEL 718(SLS). Виконаний аналіз полів напружень в зонах концентрації напруги. Отримані оцінки запасів статичної міцності вказаних деталей при розшаруванні і розриві силових шарів. Виконано порівняння отриманих запасів статичної міцності для різних місць концентрації напружень деталей, виконаних з компактних і некомпактних матеріалів.

Ефективність застосування альтернативної технології, оцінена шляхом розрахунку питомої собівартості продукції в умовах серійного виробництва при програмі випуску 1000 шт. Виконана оцінка економічного ефекту від використання технології селективного лазерного спікання і зміцнення при виробництві деталі диск з некомпактного матеріалу INCONEL 718 (СЛС) порівняно з базовою технологією при отриманні деталі з компактного матеріалу INCONEL 718 в умовах серійного виробництва. Проведено порівняння необхідних капітальних вкладень для базової і альтернативної технології. Виконана оцінка впливу альтернативної технології на соціальну і екологічну сферу життєдіяльності людини.

Зроблені висновки про перспективи впровадження технології локальної пластичної деформації алмазним вигладжуванням для розширення сфери використання СЛС при виробництві деталей для вітчизняної авіаційної і авіаційно-космічної галузі промисловості і суспільства, а також про її потенціал для інших галузей.

Ключові слова: некомпактні матеріали; селективне лазерне спікання; алмазне вигладжування; запас статичної міцності; собівартість; капітальні вкладення.

PREDICTED EFFECTS OF STRENGTHENING BY DIAMOND IRONING OF DETAILS OBTAINED BY SELECTIVE LASER SINTERING

E. Vyshnepolskyi, D. Pavlenko, Y. Dvirnyk

The analysis of the possibility of expanding the scope of selective laser sintering technology has been made for the production of parts of short-range gas turbine aircraft engines due to the strengthening of stress concentration points by local plastic deformation by diamond smoothing. The technical, economic, and social effects of the application of this technology have been considered.

The stress-strain state of complex-shaped thin-walled parts such as a disk and a monowheel of a short-life aircraft engine during their manufacture according to the traditional techniques from the compact materials VT8 and INCONEL 718 and according to the alternative technology from the materials Ti45Al3Nb (SLS) and INCONEL 718 (SLS) has been calculated and studied. The analysis of stress fields in stress concentration zones is carried out. Estimates are obtained from the static strength reserves of these parts during delamination and rupture of the force layers. A comparison of the obtained reserves of static strength for various places of stress concentration of parts made of compact and non-compact materials has been performed.

The effectiveness of the use of alternative technology has been estimated by calculating the unit cost of production in mass production with a production program of 1000 pcs. The economic effect of the use of selective laser sintering and hardening technology in the manufacture of a part of a disk made of INCONEL 718 non-compact material (SLS) is estimated in comparison with the basic technology for the production of a part made of INCONEL 718 compact material in mass production. The comparison of the required capital investments for basic and alternative technology is carried out. The impact of alternative technology on the social and environmental spheres of human life has been assessed.

Conclusions have been drawn about the prospects of introducing the technology of local plastic deformation by diamond smoothing to expand the scope of using SLS in the production of parts for the domestic aviation and aerospace industries and society, as well as its potential for other industries.

Keywords: non-compact materials; selective laser sintering; diamond smoothing; margin of static strength; cost price; capital investments.

Вишнепольский Евгений Валериевич – старший преподаватель кафедры Технологии машиностроения, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

Павленко Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, профессор кафедры Технологии авиационных двигателей, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

Двирнык Ярослав Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры Технологии авиационных двигателей, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

Yevhen Vyshnepolskyi – Senior Lecturer, Engineering technology department, National University «Zaporizhzhya Polytechnic», Zaporizhzhya, Ukraine,
e-mail: evishnepolskiy@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8048-7976.

Dmytro Pavlenko – PhD, professor, Aircraft engines technologies department, National University «Zaporizhzhya Polytechnic», Zaporizhzhya, Ukraine,
e-mail: dvp1977dvp@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6376-2879.

Yaroslav Dvirnyk – PhD, associate professor, Aircraft engines technologies department, National University «Zaporizhzhya Polytechnic», Zaporizhzhya, Ukraine,
e-mail: dvirnyk@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-5439-5413.