

УДК 621.745

## ТЕХНОЛОГИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ПРИ РЕМОНТЕ ПРЕСС-ФОРМ

© 2015 В. Г. Смелов, А. В. Сотов, Р. Р. Кяримов, А. В. Агаповичев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Пресс-форма представляет собою устройство, эксплуатируемое в условиях нагрузок в сотни тонн, циклических перепадов температуры на сотни градусов, испытывающее воздействие агрессивных веществ. В статье рассмотрена операция восстановления геометрии пресс-формы методом импульсной лазерной наплавки с подачей присадочной проволоки. Лазерная наплавка проводилась на технологической установке, включающей в себя импульсный твёрдотельный лазер на YAG:Nd с длиной волны излучения 1,06 мкм. Предложен алгоритм разработки оптимизации технологического процесса. Использование данной методики позволяет существенно уменьшить время технологической подготовки производства, а также долю экспериментальных исследований. На основании разработанной методики оптимизации подобраны параметры технологического процесса наплавки. Проведён макро- и микроанализ исследуемой поверхности. Выполнен замер микротвёрдости поперечного шлифа основного материала и наплавки для сравнения и оценки свойств. Данные значения твёрдости (HRC) были выбраны по шкале Роквелла, учитывая подходящие соотношения, полученные по Вickersу.

*Импульсная лазерная наплавка, ремонт, пресс-форма, дефект, макро- и микроструктурный анализ, наплавленный слой.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-432-437

Пресс-форма – это сложное устройство для получения изделий различной конфигурации из металлов, пластмасс, резины и других материалов под действием давления, создаваемого на литевых машинах. Пресс-формы применяют при литье металлов и полимерных материалов под давлением, литье по выплавляемым моделям, прессовании полимерных материалов [1].

Изготовление пресс-формы достаточно трудоёмкий процесс. В изготовлении пресс-формы важна точность при её проектировании и построении, что занимает много времени на доработку всех процессов. Пресс-форма должна быть выполнена без единого дефекта с ровной поверхностью для литья.

При длительной эксплуатации пресс-формы подвергаются сильным механическим и термическим воздействиям. В результате этого на рабочих поверхностях возникают дефекты, способствующие снижению качества изготавливаемых изделий и уменьшающие срок службы пресс-формы. Исправление дефектов

пресс-форм целесообразно производить, если затраты на эту работу меньше стоимости изготовления новой формы. Для ремонта пресс-форм обычно применяют сварку или пайку с использованием наплаваемых металлических материалов. Данный метод является эффективным, однако имеет и недостатки [2]:

- неоптимизированный расход наплаваемых материалов;
- энергозатратность;
- труднодоступность дефектов для сварочного аппарата;
- деформация вследствие нагрева при термическом воздействии.

При ремонте также используют лазерную наплавку. Вместо сварочного аппарата применяется лазерная установка. Примером такого оборудования является лазерная установка HTS-300Mobile.

Суть метода лазерной наплавки заключается в том, что подплавленная лазером поверхность перемешивается с присадочным материалом. При этом наплавленному слою за счёт состава присадочного материала и высоких скоростей ох-

лаждения придаются нужные физико-механические свойства. На рис. 1, а показана пресс-форма с дефектом на поверхности, который был исправлен путём ла-

зерной импульсной наплавки, на рис. 1, б показана функциональная схема процесса лазерной наплавки [3,4].

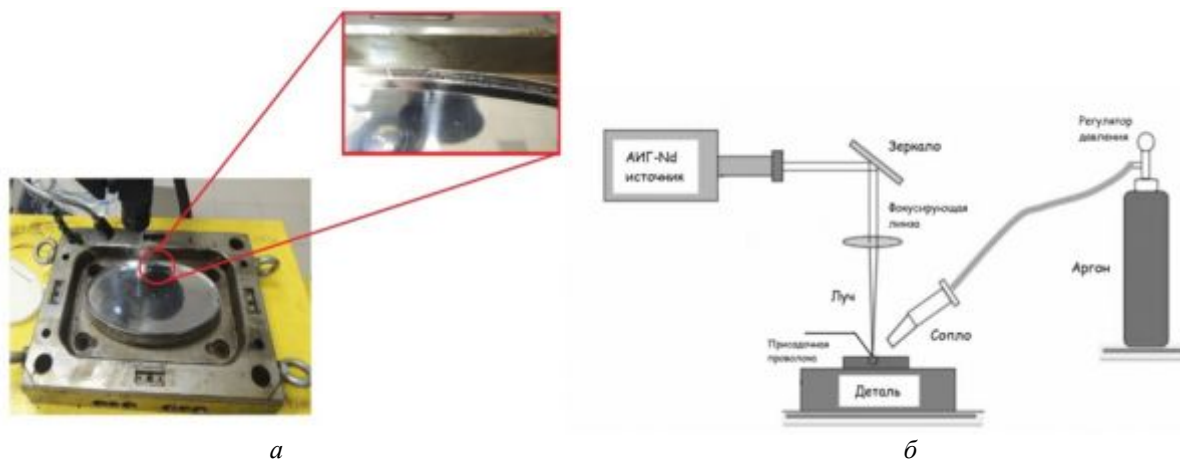


Рис.1. Процесс восстановления пресс-формы методом лазерной наплавки:

а – пресс-форма с исправленным дефектом; б – функциональная схема процесса лазерной наплавки

Присадочный материал (в виде проволоки), позволяет восстанавливать пресс-формы из сплавов на основе железа, алюминия, бериллиевой бронзы. Присадка подбирается под базовый материал пресс-формы и поставленную задачу.

Лазерная наплавка имеет преимущества перед традиционными видами восстановительного ремонта:

- уменьшенное термическое воздействие на материал пресс-формы;
- отсутствие изменения структуры металла (закалка, отпуск);
- возможность наращивания очень тонких слоёв материала (от 0,1 мм);
- широкий выбор присадочных материалов;
- качество наплавки – отсутствие полостей, каверн и т.д.

Основным недостатком лазерной наплавки является способ подачи проволоки, когда оператор установки вручную подводит присадочный материал к месту обработки.

В данной работе была произведена операция восстановления геометрии фрагмента пресс-формы с использованием технологии импульсной лазерной наплавки. Для отработки технологии восстановления был подобран металлический фраг-

мент пресс-формы из легированной стали марки X12, химический состав которой включает: С 2-2,2; Si 0,1-0,4; Mn 0,15-0,45; Ni до 0,35; S до 0,03; P до 0,03; Cr 11,5-13; Mo до 0,2; W до 0,2; V до 0,15; Ti до 0,03; Cu до 0,3; Fe - 83. Сталь X12 применяется для изготовления формующих деталей пресс-форм, относится к категории мягких сталей (стали для холодного деформирования) твёрдостью до НВ 250. Главные части пресс-формы изготавливаются из стали, закалённой до твёрдости более 48 HRC. Пресс-формы из стали X12 обеспечивают высокую производительность, подходят для литья абразивных пластиков и изделий, требующих малых допусков. Пресс-формы такого рода являются высококачественными и достаточно дорогими в изготовлении. В подобранном фрагменте пресс-формы предварительно фрезерованием были получены три паза, имитирующие дефект (рис.2).

Для лазерной наплавки пазов фрагмента пресс-формы были использованы три разновидности проволок и подобраны три разных режима лазерного излучения. Для восстановления фрагмента пресс-формы был оптимизирован алгоритм проведения лазерной наплавки, разработанный ранее в [3].



Рис.2. Пазы, вырезанные во фрагменте пресс-формы

Следуя алгоритму, на первом этапе была проведена оценка начального со-

стояния восстанавливаемой поверхности пресс-формы. Изготовленные фрезерованием пазы, имитирующие дефект, имели глубину 5 мм. Дополнительная механическая обработка не потребовалась, была произведена окончательная очистка поверхности, подготовка под наплавку.

Следующим этапом был подбор проволоки с различным химическим составом для каждого паза отдельно. Химический состав проволок приведён в табл. 1. Используемые проволоки применяются для нанесения буферных слоёв, заварки различных видов дефектов. Диаметр наплавляемых металлических проволок составлял 0,4 мм.

Таблица 1. Химический состав наплавляемых проволок

| № проволоки | C    | Cr   | Mo  | Fe     | W | V | Nb  | Ni     | Si  | Mn  | Ti | Cl | B | S | P |
|-------------|------|------|-----|--------|---|---|-----|--------|-----|-----|----|----|---|---|---|
| 1           | 0,25 | 5,0  | 4,0 | основа | - | - | -   | -      | 0,5 | 0,7 | -  | -  | - | - | - |
| 2           | 0,22 | 17,5 | 1,2 | основа | - | - | -   | -      | 0,7 | 0,7 | -  | -  | - | - | - |
| 3           | 0,02 | 22,0 | 9,0 | 1,0    | - | - | 3,5 | основа | 0,2 | -   | -  | -  | - | - | - |

В получении требуемого химического состава наплавленного слоя металла данный этап является важным, так как позволяет обеспечить требуемые свойства восстанавливаемой поверхности.

Далее был проведён подбор параметров процесса лазерной наплавки под каждую проволоку. Основными параметрами процесса являются мощность и длительность импульсов, диаметр сфокусированного излучения, частота импульсов, положение фокального пятна относительно поверхности наплавляемой детали [5]. На завершающем этапе была произведена импульсная лазерная наплавка.

После выполнения лазерной наплавки было проведено исследование качества наплавленного материала. В частности, были проведены металлографические исследования, замер твёрдости в зоне наплавки и основного материала фрагмента пресс-формы. Для этого были изготовлены три формы поперечных микрошлифов образцов из фрагмента пресс-формы.

Шлифовальная обработка заключалась в тщательном выравнивании поверх-

ностей поперечного сечения трёх пазов с наплавленными проволоками. При внешнем осмотре наплавленных соединений образцов № 1, № 2, № 3 фрагмента пресс-формы на макроуровне трещин, несплавлений и других дефектов не обнаружено. Для более детального изучения микроструктуры наплавленного соединения проведено травление поверхности шлифа. Образцы вытравливались в течение 4...5 мин в холодном реактиве, состоящем из 100 см<sup>3</sup> HCl, 5 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20 г CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O, 80 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O.

После травления шлифа была выявлена граница соединения основного материала пресс-формы с наплавленным слоем металла. Анализ микроструктуры образца №1 и №3 показал, что материал наплавки содержит включения и несплавления между слоями (рис. 3).



Рис.3. Микроструктура зоны «наплавка-основной материал» образца № 1



Рис.4. Микроструктура зоны «наплавка-основной материал» образца № 2

Более качественной микроструктурой в районе сплавления обладал образец № 2 (рис. 4).

После микроструктурного анализа был произведён замер твёрдости трёх образцов. В данной работе замер твёрдости является одним из важных этапов, так как он позволяет оценить и сравнить свойства основного материала пресс-формы и материала наплавки.

При измерении микротвёрдости образцов пресс-формы был использован микротвёрдомер ПМТ-3 с нагрузкой 200 г. Замер проводился в поперечных сечениях микрошлифов в зоне наплавленного материала и для проведения сравнения в основном материале образцов. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты замера микротвёрдости образцов основного и наплавленного материалов

| № образца  | Твёрдость, HRC    |                              |
|------------|-------------------|------------------------------|
|            | Основной материал | Зона наплавленного материала |
| образец №1 | 18...26           | 30...36                      |
| образец №2 | 21...25           | 31...37                      |
| образец №3 | 23...27           | 20...22                      |

Анализ полученных значений показал, что твёрдость наплавленного слоя в образце № 1 и № 2 выше твёрдости основного металла пресс-формы. Образец № 3 имеет достаточно равномерное распределение микротвёрдости по сечению. Данные значения твёрдости (HRC) были выбраны по шкале Роквелла, учитывая подходящие соотношения, полученные по Викерсу [6].

Исследования проведены на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEFI59314X0003).

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

### Библиографический список

1. Группа компаний Промышленные технологии. <http://toplast.ru/routing.php?url=page/rezhimy-raboty-press-formy>.

2. Барвинок В.А., Смелов В.Г., Сотов А.В., Косырев С.А. Восстановление торца пера лопатки ГТД метод импульсной лазерной наплавки // Проблемы машино-

строения и автоматизации. 2014. № 3. С. 158-162.

3. Smelov V.G., Sotov A.V., Kosirev S.A. Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. V. 9, no. 10. P. 1854-1858.

4. Кудрявцева А.Л. Применение лазерного оборудования в авиационно-космической отрасли // РИТМ (Ремонт

Инновации Технологии Модернизация). 2009. № 4(42). С. 32-36.

5. Ермолаев А.С., Иванов А.М., Василенко С.А. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2013. № 35.С. 49-63.

6. Инженерный справочник. Таблицы DPVA. info. <http://www.dpva.info/guide/guideunitsalphabets/guideunitsalphabets/hardness/shkala/>

### Информация об авторах

**Смелов Виталий Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении и ремонте деталей.

**Сотов Антон Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [SotovAnton@yandex.ru](mailto:SotovAnton@yandex.ru). Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении и ремонте деталей.

**Кяримов Рустам Равильевич**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [rustam9395@mail.ru](mailto:rustam9395@mail.ru). Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении и ремонте деталей.

**Агаповичев Антон Васильевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении и ремонте деталей.

## TECHNOLOGY OF PULSED LASER SURFACE COATING IN PRESSING TOOL REPAIR

© 2015 V. G. Smelov, A. V. Sotov, R. R. Kyarimov, A. V. Agapovichev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

A pressing tool is a rather complicated device operated in the conditions of loading of hundreds of tons, periodic temperature gradients of hundreds of degrees, and subject to the influence of corrosives. The paper describes the operation of restoring the geometry of the tool by pulsed laser surface coating with filler metal feed. Laser cladding is carried out on a process installation including a pulse solid-state laser on YAG: Nd with the emission wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$ . An algorithm of optimizing the design process is proposed. Using this technique makes it possible to significantly reduce the time of technological preparation of production, as well as the proportion of pilot studies. On the basis of the developed optimization techniques process parameters of laser



cladding are selected. Macro- and micro- analysis of the surface under investigation is also carried out. Micro-hardness of the cross section of the basic material and surface coating is measured for the comparison and evaluation of their properties. The values of hardness (HRC) are chosen according to Rockwell hardness scale taking into account suitable ratios obtained according to Vickers (HV). Measurements of the material hardness are required to identify the ability to resist elastic and plastic deformation or fracture in the case of introducing a harder metal solid that does not take permanent set in the surface layer of the material.

*Pulsed laser cladding (surface coating), repair, pressing tool, damage, macro- and microanalysis of the surface, weld overlay deposit.*

## References

1. *Gruppa kompaniy Promyshlennye tekhnologii* [Group of companies. Industrial technology]. Available at: <http://toplast.ru/routing.php?url=page/rezhimy-raboty-pressform>.
2. Barvinok V.A., Smelov V.S., Sotov A.V., Kosirev S.A. Repair of gas turbine blade tip by impulse laser build-up welding. *Engineering and Automation problems*. 2014. No. 3. P. 158-162. (In Russ.)
3. Smelov V.G., Sotov A.V., Kosirev S.A. Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. V. 9, no. 10. P. 1854-1858.
4. Kudryavceva A.L. Use of laser equipment in aerospace industry. *RITM*. 2009. No. 4(42). P. 32-36. (In Russ.)
5. Ermolov A.C., Ivanov A.M., Vasilenko S.A. Laser technology and processes when manufacturing and repair of details of the gas turbine engine. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2013. No. 35. P. 49-63. (In Russ.)
6. *Inzhenernyy spravochnik. Tablitsy DPVA. info* [Engineering reference book. DPVA tables]. Available at: <http://techob.ru/katalog/katalog-priborov/13.-tolshhinomeryi-tverdomeryi/13.2.-tverdomeryi/mikrotverdomer-pmt-3m.html>.

## About the authors

**Smelov Vitaly Genadievich**, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Area of research: the use of additive technologies in manufacture and repair of component parts of aviation and aerospace industry.

**Sotov Anton Vladimirovich**, post-graduate student, engineer of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [SotovAnton@yandex.ru](mailto:SotovAnton@yandex.ru). Area of research: the use of additive technologies in manufacture and repair of component parts of aviation and aerospace industry.

**Kyarimov Rustam Ravilevich**, student of Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [rustam9395@mail.ru](mailto:rustam9395@mail.ru). Area of research: the use of additive technologies in manufacture and repair of component parts of aviation and aerospace industry.

**Agapovichev Anton Vasilevich**, post-graduate student, engineer of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Area of research: the use of additive technologies in manufacture and repair of component parts of aviation and aerospace industry.