

# Повышенная безопасность в автомобильной и авиационной промышленности

Оценка сверхмногоциклового усталости деталей, произведённых методом лазерной плавки



Рисунок 1: Общий вид испытательной машины Shimadzu USF-2000

**В**ыборочная лазерная плавка (SLM – selective laser melting) – это процесс производства авто- и авиакомпонентов из порошковых материалов с помощью энергии лазера. Трёхмерная модель детали загружается в программное обеспечение аппарата для SLM, где она сканируется и нарезается на двухмерные слои (изображения). Лазер послойно плавит частицы порошка строго в соответствии с этими изображениями, в результате чего получают готовую деталь сложной формы.

Эти уникальные возможности метода SLM делают его привлекательным для применения в аэрокосмической, автомобильной и биомедицинской отраслях. Множество сплавов на основе алюминия, титана, железа и никеля были

получены данным методом [1, 2]. Хотя  $\sigma_{max}$  для материалов, полученных путем SLM, в «сыром» состоянии снижена из-за шероховатости поверхности, усталостная

прочность после обработки достаточно высока, что делает их пригодным для использования в авиационной и медицинской отраслях [1]. Ранее предполагалось, что

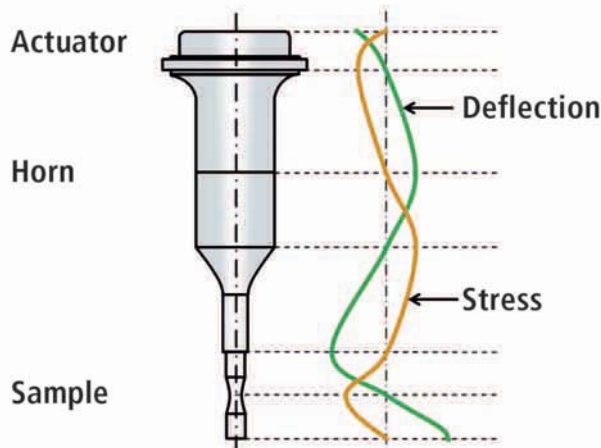


Рисунок 2. Схема нагружения образца, установленного в испытательную машину Shimadzu USF-2000

материалы в ходе эксплуатации не могут быть разрушены, если при этом не превышает их предел усталости. Однако позднее было обнаружено, что при сверхмногоцикловых испытаниях (СВМИ) материалы разрушаются, даже если прикладываемое напряжение ниже предела усталости [3, 4]. Также было показано, что при проведении СВМИ сплавов с разными кристаллическими решётками (объёмно-центрированная и гранецентрированная) местоположение зарождения трещины смещается с поверхности вглубь образца [5].

## Методика эксперимента

Образцы для испытаний из алюминий-кремниевый сплав были получены с помощью коммерчески доступной системы SLM в среде инертного газа (аргона). Подробное описание процесса можно найти в работе [1]. Квазистатические испытания на растяжение были проведены в соответствии с ISO 6892-1:2009. Тесты по увеличению длительной нагрузки проводились, начиная с амплитуды напряжения в 30 МПа. Амплитуда напряжения постепенно увеличивалась на 10 МПа за  $10^4$  цикла. Вышеописанные опыты, а также испытания при постоянной нагрузке проводили на частоте 20 Гц. Результаты этих испытаний, а также методология измерений для характеристики образующихся в ходе тестов дефектов опубликованы в работах [2, 6].

В этих тестах использовали два типа образцов. Первая группа образцов не подвергалась термообработке, тогда как образцы вто-

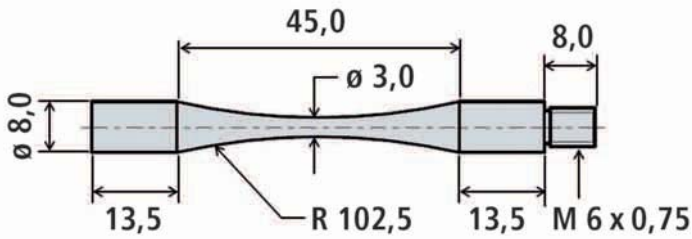


Рисунок 3. Размеры образца для испытательной машины Shimadzu USF-2000

рой группы были подвергнуты термообработке при температуре 200 °С.

Сверхмногоцикловые испытания проводились на ультразвуковой установке для динамических испытаний с частотой 20 кГц. На рисунке 1 представлен общий вид установки для динамических испытаний Shimadzu USF-2000, а на рисунке 2 – принцип её работы. В качестве актуатора в USF-2000 используется электрический пьезокристалл, который генерирует колебания на фиксированной частоте в 20 кГц. Эти колебания передаются на образец. Причём система сконструирована таким образом, что этот образец резонирует.

Образец, выполненный по чертежу, представленному на рисунке 3, закрепляется в установке только резьбовым концом, а другой конец образца остается свободным. Геометрия образца такова, что максимальная нагрузка приходится на его середину (узкую часть), а максимальная деформация – на свободный конец. Чтобы исключить влияние разогрева образца до высоких температур под действием высокой частоты нагрузки, образец всё время охлаждался сжатым воздухом и тесты проводились в режиме импульс-пауза 50:50, т.е. система была настроена резонировать 200 мс, а затем останавливалась на 200 мс для охлаждения образца, а затем снова подавалась нагрузка на 200 мс. Эксперименты по определению усталостной прочности проводили в течение  $10^9$  циклов по ступенчатому принципу. Если образец разрушался в ходе испытаний за  $10^9$  циклов, то нагрузку в новом тесте понижали на 5 МПа. Если же образец не разрушался в ходе испытаний за  $10^9$  циклов, то нагрузку в следующем эксперименте повышали на 5 МПа. Разрушение об-

разца фиксируется по изменению резонансной частоты. В ходе образования и развития подповерхностной микротрещины в образце происходит потеря резонансной частоты, в результате чего испытательная машина Shimadzu USF-2000 прекращает работу.

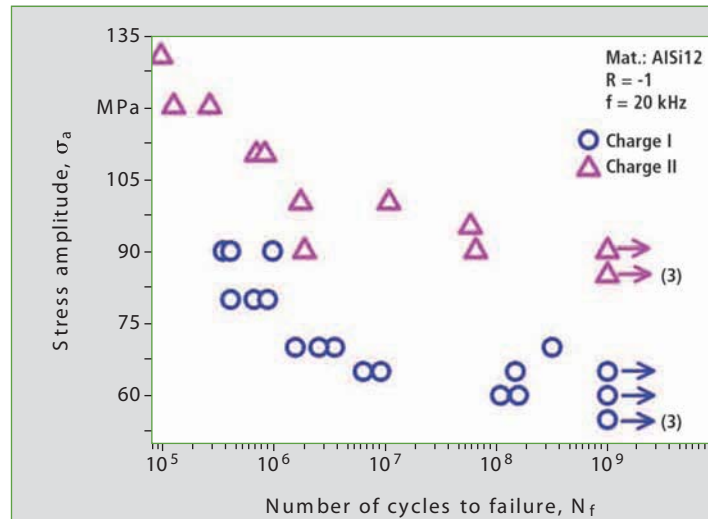


Рисунок 5: Графики усталостных испытаний для двух групп образцов (кружок – без термообработки, треугольник – с термообработкой)

### Результаты

На рисунке 4 приведены фотографии металлографического исследования образцов двух разных групп. Присутствие пор на фотографии обусловлено включениями газов в структуру образца. Изучались различия в количестве пор в образцах, приготовленных без термообработки и с термообработкой. В образцах, прошедших термообработку, отсутствуют крупные поры, которые критичны для усталостной прочности металлов. Уменьшение числа крупных пор обусловлено дегазацией в ходе термообработки металла.

На рисунке 5 представлены графики для многоцикловых и сверхмногоцикловых усталостных ис-

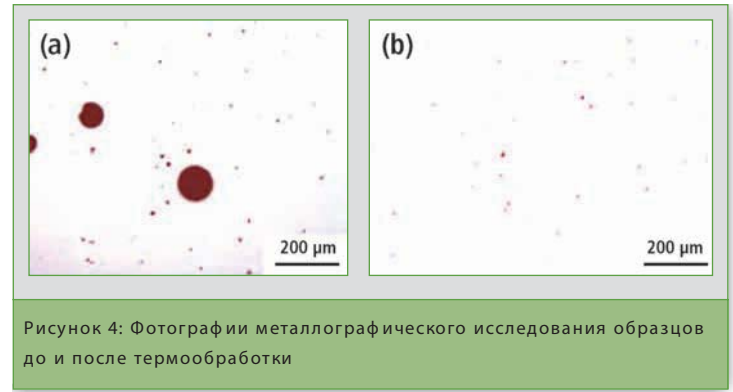


Рисунок 4: Фотографии металлографического исследования образцов до и после термообработки

пытаний для двух групп образцов. Показано, что вне зоны сверхмногоцикловых испытаний усталостные разрушения характерны для всех типов образцов. Однако пре-

метров обработки материалов (металлов и сплавов) на их эксплуатационные характеристики в широком диапазоне.

### Авторы

Prof. Dr.-Ing. Frank Walther, M.Sc. Shafaqat Siddique, Technische Universitaet Dortmund, Fachgebiet Werkstoffprueftechnik (WPT) Baroper Str. 303, 44227 Dortmund, Germany, Tel.: +49 (0)231 755 8028 E-Mail: frank.walther@tu-dortmund.de Web: www.wpt-info.de

### Литература

- [1] Siddique, S.; Wycisk, E.; Frieling, G.; Emmelmann, C.; Walther, F.: Microstructural and mechanical properties of selective laser melted Al 4047. Applied Mechanics and Materials 752-753 (2015) 485-490.
- [2] Siddique, S.; Imran, M.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.; Walther, F.: Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology 221 (2015) 205-213.
- [3] Pyttel, B.; Schwerdt, D.; Berger, C.: Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit? International Journal of Fatigue 33 (2011) 49-58.
- [4] Benedetti, M.; Fontanari, V.; Bandini, M.: Very high cycle fatigue resistance of shot-peened high strength aluminium alloys. Experimental and Applied Mechanics 4 (2013) 203-211.
- [5] Morrissey, R.J.; Nicholas, T.: Fatigue strength of Ti-6Al-4V at very long lives. International Journal of Fatigue 27 (2005) 1608-1612.
- [6] Siddique, S.; Imran, M.; Rauer, M.; Kaloudis, M.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.; Walther, F.: Computed tomography for characterization of fatigue performance of selective laser melted parts. Materials & Design 83 (2015) 661-669.

дел выносливости для материала, прошедшего термообработку, примерно на 45% выше, чем для необработанного. Он составляет, соответственно,  $88,7 \pm 3,3$  МПа и  $60,5 \pm 4,7$  МПа, что можно объяснить отсутствием микропор в термообработанном металле.

### Перспективы

Новые разработки в области испытательных машин дают нам возможность выйти за пределы предыдущих познаний. Это открывает нам дверь к тестированию другого уровня в наиболее реалистичных условиях. Новые функции у испытательных машин предоставляют исследователям мощные инструменты для дальнейшего изучения влияния пара-