

УДК 620.179.14/15

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ
АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Н. БУСЬКО

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

Производство стальных изделий и деталей, основанное на применении аддитивных технологий (АТ), относится к наиболее перспективным и динамично развивающимся прикладным технологиям и научным направлениям. АТ предполагают формирование конечного изделия путем последовательного «наращивания» материала слой за слоем, что позволяет значительно ускорить процесс их изготовления с высокой точностью и скоростью с применением трёхмерной печати. К основным преимуществам АТ-изделий (изделия/образцы, изготовленные с применением аддитивных технологий), в сравнении с изготовленными традиционными методами (литьё, прокат, штамповка, фрезерование, точение, сверление и др.), относятся: получение изделия с улучшенными физико-механическими свойствами (ФМС), снижение массы (до 50 %), повышенные точность изготовления и прочность, скорость печатания 3D-принтеров достигает до 100 см³/ч и более, что значительно превышает традиционное производство (до 30 раз) и т. д. Ряд препятствий сдерживают внедрение АТ-изделий: высокая себестоимость стальных порошков, печатающего 3D-оборудования и его обслуживания (до 100 раз), наличие анизотропии, шероховатости, неоднородности, остаточных напряжений и других дефектов. Имеется положительный опыт применения АТ-изделий в машиностроении, космонавтике, ракетостроении, авиа- и двигателестроении, в строительстве, медицине, стоматологии, биомедицине.

Важной характеристикой 3D-изделий является усталостная долговечность (УД). Однако циклические испытания при изучении механизмов накопления усталостной повреждаемости и определения количественных оценок УД из-за наличия слоистой структуры, отсутствия специальных испытательных машин и стендов, практически не проводились, поэтому изучение УД относится к приоритетным направлениям. Учитывая специфические особенности (главная – влияние множества факторов, каждый из них в отдельности может оказать решающее воздействие на качество 3D-изделий), свойства и малоразмерность 3D-образцов, для их испытания и изучения УД необходимы специальные программы, новые методики и испытательное оборудование.

Цель работы – разработка программы и методики проведения механических испытаний при изгибе консольно закрепленного образца для исследования усталостной долговечности в лабораторных условиях.

С учетом целей и задач работы, наличия особенностей и влияющих на УД 3D-изделий факторов, метода исследования и аппаратуры разработаны

программа и методика механических испытаний образцов, состоящая из перечня (без строгой последовательности) шагов и процедур, сведённых в табл. 1.

Табл. 1. Программа и методика проведения механических испытаний при изгибе малогабаритных АТ-образцов при исследовании усталостной долговечности

Но- мер шага	Пошаговое содержание программы механических испытаний
1	Для механических испытаний выбран метод, основанный на изгибе консольно закрепленного образца, являющийся наиболее удобным. Размеры образцов должны соответствовать ГОСТ 25.502–79 и ГОСТ 25347–82. Перед испытаниями необходимо протестировать их на соблюдение геометрических размеров, плоскостности, прямолинейности, шероховатости от заданных, т.к. их малое отклонение от нормы, из-за наличия остаточных напряжений (ОН) может повлиять на результат. При наличии ОН после механических операций шлифования, фрезерования или электроискровой резки для снижения их уровня образцы необходимо подвергнуть отжигу и, возможно, нормализации. В процессе механических испытаний для изучения изменений структуры, наличия ОН, анизотропии, неоднородности и других параметров, рекомендуется использовать магнитные методы [1], в т. ч. метод эффекта Баркгаузена (МЭБ)
2	Перед проведением циклических испытаний и исследований образцов на УД для последующего анализа и сопоставления с данными других физических методов НК целесообразно исследовать исходные (до циклирования) ФМС. Устанавливают консольно образец в стенд-установку [2] (или портативную версию). Изгибают свободный конец образца путём воздействия на него нагрузкой F с помощью силового возбудителя в виде подшипника качения с амплитудой прогиба Δ , мм, соответствующего напряжению растяжения σ , МПа, при изгибе, и измеряют уровень магнитного шума (МШ) накладным датчиком, периодически устанавливаемым в зоне шейки образца. В случае использования иного физического метода и информативного параметра проводится аналогичная процедура
3	На каждом из представителей образцов из разных марок и формы металлических порошков, разных методов их получения; с различной анизотропией, неоднородностью, дефектностью, режимами механической, термической или других видов обработок с помощью разных типоразмеров датчиков при едином уровне прогиба Δ , мм, и соответствующего ему уровню создаваемых напряжений σ , МПа, образца, определяют максимальную чувствительность МШ $\eta = U_{\text{эф}}/\sigma$, т. е. отношения уровня МШ к уровню формируемых в образце механических напряжений, где уровень $U_{\text{эф}}$ – это среднеквадратичное значение ЭДС от скачков намагниченности, мВ. Максимальное значение η определяется путем изменения параметров режимов перемагничивания – частоты, амплитуды тока перемагничивания и анализа МШ
4	При испытаниях измеряют такой важный показатель, как количество циклов нагружения N , характеризующее выносливость материала деформациям при симметричных или асимметричных переменных циклах напряжений с разными коэффициентами асимметрии R при малоцикловых (до $50 \cdot 10^4 \dots 50 \cdot 10^5$ циклов) и многоцикловых ($\geq 10^5$ циклов) испытаниях. С ростом N периодически измеряют МШ. При достижении критических значений N в зоне заземления образца под действием нагрузок вначале образуются микро-, а затем и макротрещины, что приводит в итоге к разрушению. Максимальное значение параметра N , при котором наступило разрушение образца, принимается за критериальный параметр УД данного образца, являющийся количественным показателем

Окончание табл. 1

Но- мер шага	Пошаговое содержание программы механических испытаний
5	Проводятся циклические испытания при разных условиях нагружения и состоянии ФМС и измеряется МШ в зависимости от N вплоть до разрушения образца. При этом исследуется взаимосвязь уровня МШ с маркой и параметрами порошков, режимами спекания (для СЛС и ему аналогичного метода) и параметрами 3D-принтера, условиями и режимами механических испытаний (амплитуда и частота нагружения, коэффициент асимметрии R), с ФМС образцов, с механической, магнитной и другими видами анизотропии, неоднородностью свойств, зонами концентрации напряжений, пористостью, наличием, видом и количеством дефектов [3] и т. д.
6	С учётом целей и задач образцы нагружают при разных частотах и напряжениях, состояния поверхности, плоскостности, прямолинейности, анизотропии, дефектности. Параллельно с измерениями МШ с ростом N , при необходимости, оценивают УД и ФМС образцов, подключая другие методы испытания и исследования. Данные отражаются в таблицах, строятся графики, диаграммы, анализируются, обрабатываются и сопоставляются между собой и данными других методов. Формулируются выводы и практические рекомендации

Таким образом, формируемая в готовых трёхмерных изделиях специфическая слоистая структура, в отличие от полученных классическими способами изделий, обладает рядом особенностей. Это привело к необходимости разработки программы и методики механических испытаний при изучении сопротивления циклической деформации. Практическая реализация применительно к образцам стали 09Г2 показала их эффективность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества готовых деталей аддитивного производства / Н. П. Алёшин [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 10. – С. 63–75.
2. Бусько, В. Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов / В. Н. Бусько // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 165–167.
3. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества деталей непосредственно в процессе аддитивного производства / Н. П. Алёшин [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 64–71.