

УДК 620.179.14/15

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ В ОБРАЗЦАХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

В. Н. БУСЬКО

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Исследование и оценка технологической анизотропии физико-механических свойств (ФМС) стальных материалов, в том числе полученных с помощью аддитивных технологий (АТ), в настоящее время относится к востребованным и необходимым прикладным задачам. Анизотропия ФМС оказывает существенное влияние на прочностные характеристики материалов, изделий и конструкций [1]. С развитием АТ актуальность исследования оценки анизотропии в сталях будет возрастать.

При изготовлении материалов и изделий с помощью АТ возникающая в них анизотропия, наряду с неоднородностью, остаточными напряжениями, пористостью, дефектностью, состоянием поверхности, относится к сдерживающим факторам получения высоких ФМС и более широкого внедрения в промышленность. Анизотропия, обусловленная образованием слоистых структур при использовании различных методов изготовления 3D-материалов, в отличие от полученных с помощью традиционных способов, как правило, является более ярко выраженной, поэтому ее исследование, оценка и неразрушающий контроль на стадиях изготовления и при эксплуатации материала требует повышенного внимания. Цель работы – исследование возможности выявления и оценки технологической анизотропии в стальных образцах, полученных селективным лазерным спеканием/сплавлением (СЛС), с использованием метода эффекта Баркгаузена (МЭБ), информативные параметры которого относятся к магнитоанизотропным [2, 3].

На рис. 1, *а–в* приведен внешний вид образца из конструкционной стали размером  $30 \times 30 \times 7$  мм в форме квадрата и трех образцов в виде балки размером  $70 \times 30 \times 15$  мм толщиной 2 мм (рис. 1, *г*) из стали 09Г2С, полученных методом СЛС (два 3D-образца) и один – литой (для сравнения), изготовленные разными производителями. Из рис. 1, *а–в* видно, что образец имеет неровную, а как бы шероховатую поверхность, на срезе трёхмерного образца (см. рис. 1, *б, в*) просматривается периодическая среднеячеистая структура, обусловленная особенностями метода СЛС; образцы в виде балки (см. рис. 1, *г*) имеют гладкую поверхность.

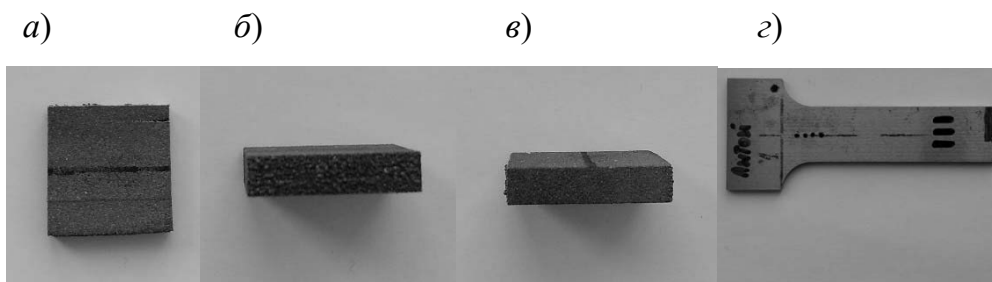


Рис. 1. Полученные с помощью СЛС образец-пластина (*а–в*) в форме квадрата (изготовитель 1) и образцы в виде балки (*г*) из стали 09Г2С

На рис. 2, а показаны круговые диаграммы (КД) зависимости уровня магнитного шума (МШ) от угла поворота  $\varphi$  преобразователя Баркгаузена (ПБ) вокруг оси в центре противоположных сторон образца конструкционной стали. Измерения МШ выполнялись на приборе ИМШ с ПБ с высокой локальностью измерений МШ ( $S_{\text{изм.обм.}} \approx 2 \text{ мм}^2$ ). Анализ КД выявил наличие магнитной анизотропии в образце, четко видны угловые зоны с максимальным ( $\varphi = 80^\circ \dots 90^\circ, 265^\circ \dots 270^\circ$ ) и минимальным ( $0^\circ \dots 180^\circ$ ) значением МШ для обеих сторон, что связано с технологией изготовления образца (диаметра порошков, режимами спекания, параметрами лазерного оборудования и направлением печати). Похожий результат получен при исследовании ФМС ячеистой структуры образцов из сплава ХН58МБЮ: среднее значение модуля упругости при сжатии оказалось в 2 раза выше, чем у образцов, испытанных вдоль направления печати образцов [4].

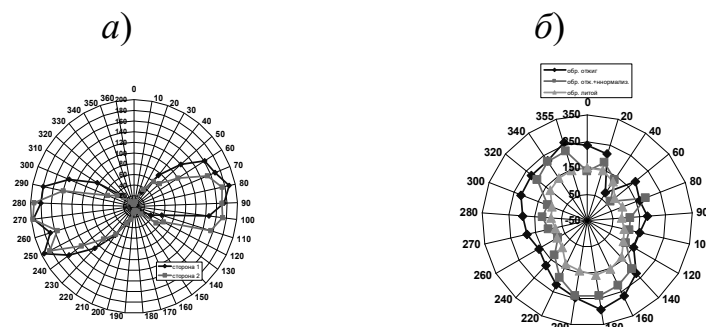


Рис. 2. Диаграммы зависимости уровня МШ от угла поворота ПБ для двух сторон АТ образца конструкционной стали (а) и образцов из стали 09Г2С (б)

Второй пример оценки анизотропии магнитошумовым методом (рис. 2, б) иллюстрирует КД, полученные на двух 3D-образцах и литом образце из стали 09Г2С до циклирования, из которых также видно наличие технологической анизотропии. Учитывая соотношение размеров и форм между образцами и ПБ, полученные зависимости характеризуют не только магнитную анизотропию ФМС, но и краевой эффект, который остаётся постоянной величиной и не является мешающим фактором.

Приведенные примеры показывают не только наличие технологической анизотропии в 3D-образцах, выявленной с помощью метода эффекта Баркгаузена, но и возможность её оценки и контроля.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке совместного проекта между БРФФИ и РФФИ (грант № Т20Р–119).*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микляев, П. Г. Анизотропия механических свойств металлов / П. Г. Микляев. – Москва: Металлургия, 1986. – 224 с.
2. Горкунов, Э. С. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов (обзор 1) / Э. С. Горкунов, Ю. Н. Драгошанский // Дефектоскопия. – 1999. – № 6. – С. 3–33.
3. Бусько, В. Н. Исследование и оценка механической анизотропии сталей и сплавов магнитошумовым методом / В. Н. Бусько, А. А. Осипов // В мире НК. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 50–56.
4. Акушевич, В. А. Исследование прочностных характеристик ячеистых образцов, изготовленных аддитивным способом / В. А. Акушевич, А. И. Зыков, И. Г. Толмачева // Изв. ТулГУ. – 2019. – Вып. 5. – С. 424–430.