УДК 621.791:669

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕНОСТЕЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СПЛА-ВА АМг5, ПОЛУЧЕННОГО ПУТЁМ АДДИТИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ WAAM

Аносов М.С. – к.т.н., доцент кафедры технологии и оборудования машиностроения, Едакин А.А. – студент, Аносова Е.С. – ассистент кафедры автоматизации машиностроения, Пьянзин А.М. - ассистент кафедры автоматизация машиностроения, Лайша А.К. - ассистент кафедры автоматизации машиностроения
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия, г. Нижний Новгород

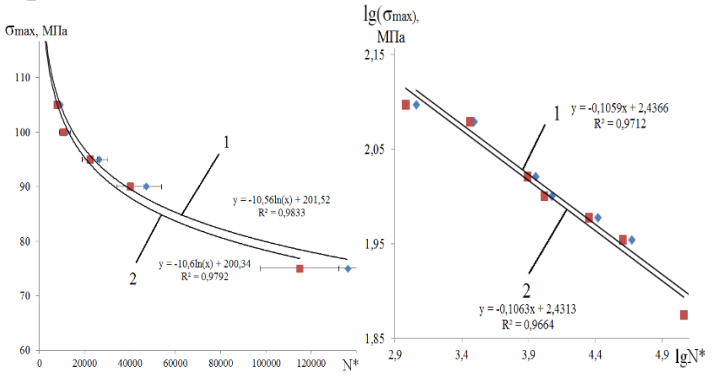
Современное машиностроение и авиакосмическая отрасль предъявляют повышенные требования к конструкционным материалам, сочетающим высокую прочность, низкую плотность и коррозионную стойкость. Алюминиево-магниевые сплавы, в частности сплав АМг5, широко применяются благодаря их удовлетворительному комплексу механических свойств и технологичности [1, с 1140]. В последнее время все большее внимание уделяется аддитивным технологиям, таким как WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), которые позволяют изготавливать крупногабаритные детали сложной формы с сокращением временных и материальных затрат по сравнению с традиционными методами [2, с 561].

Однако, при использовании аддитивного выращивания, материал характеризуется специфической макро- и микроструктурой, обусловленной слоистым характером наплавки и термическими циклами. Это, в свою очередь, может существенно влиять на механические свойства, в частности на сопротивление усталостному разрушению, которое является критически важным для деталей, работающих в условиях циклического нагружения. [1, с570]

Несмотря на растущий интерес к WAAM, вопросы, связанные с усталостной долговечностью и механизмами разрушения алюминиевых сплавов, полученных этим методом, остаются недостаточно изученными. Особую важность имеет исследование анизотропии свойств, вызванной направлением выращивания, а также кинетики роста усталостных трещин [4, с 27].

Целью настоящей работы является исследование особенностей усталостного разрушения сплава АМг5, полученного по технологии WAAM. В задачи исследования входило: построение кривых усталости для образцов, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, определение предела выносливости, анализ микроструктурных изменений в процессе циклического нагружения и изучение кинетики роста макротрещин в зависимости от приложенной амплитуды напряжений.

Экспериментальные исследования. Анализ экспериментальных данных. Испытания на усталость для сплава АМг5 проводились в диапазоне амплитуд напряжений σmax от 70 до 115 МПа. Кривая усталости для сплава АМг5 для образцов, полученных вдоль и поперек относительно наплавки, показаны на рис. 1 (кривая 1 и 2 соответственно).



а) б)

Рисунок 1 - Кривые малоцикловой усталости сплава АМг5 (в координатах σmax – N* (а) и двойных логарифмических (б) координатах) полученного: 1 – вдоль относительно направления наплавки, 2 – поперек относительно направления наплавки

Согласно полученным данным (рис. 1б) определен тангенс угла наклона (tg(αw)) левой ветки кривой усталости в координатах $\lg \sigma - \lg N$.

Полученные данные показаны в табл. 1.

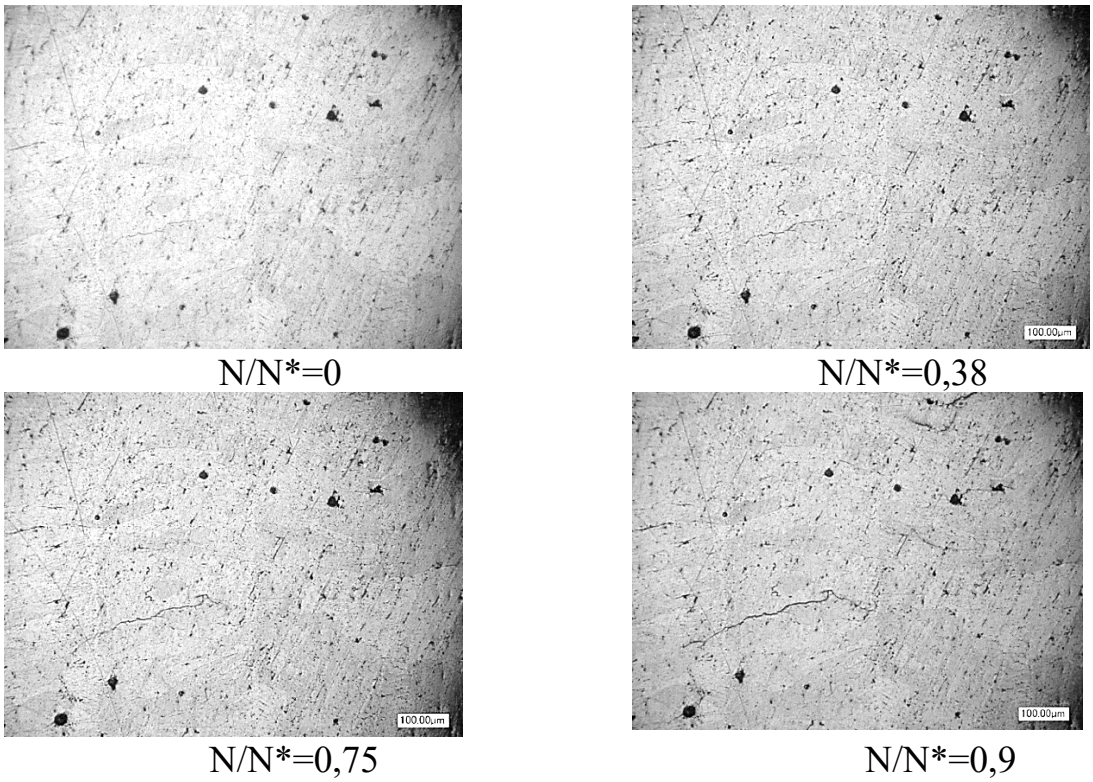
Таблица 1 - Усталостные характеристики сплава АМг5

Образцы стали Амг5 для образцов, вырезанных:	Тангенс угла наклона tg(αw) левой ветки кривой усталости	Предел выносливости σ-1, МПа*
Вдоль относительно направления наплавки (1)	0,1059	70
Поперек относительно направления наплавки (1)	0,1063	68
* Определен условно, на основе испытания образца при указанной амплитуде и имеющем долговечность выше 1*106		

Как следует из табл. 1, у алюминиевого сплава АМг5, полученного вдоль и поперек относительно направления наплавки сопротивляемость усталости отличается не более чем на 7%. Предел выносливости исследуемых образцов также отличается незначительно.

Понижение температуры практически не сказывается на усталостных свойствах сплава АМг5.

Результаты исследования микроструктуры показаны на рисунке 2.



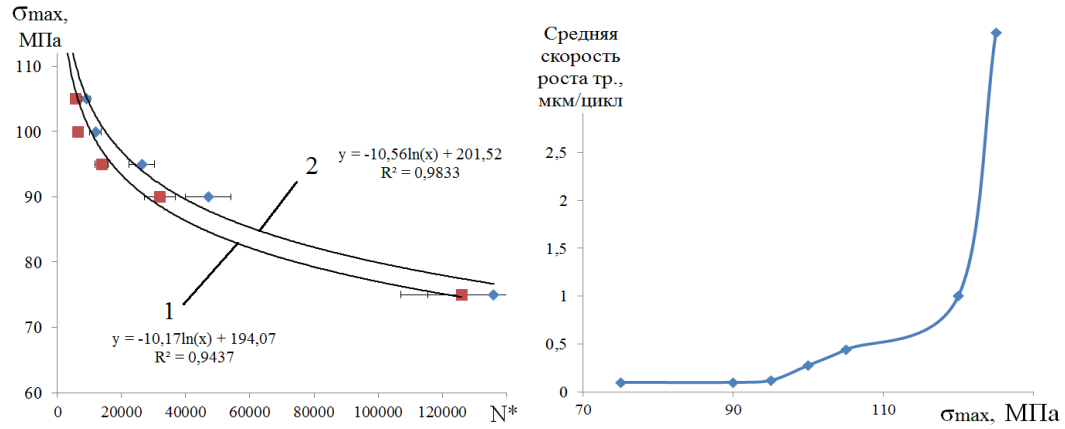
N/N*=0 N/N*=0,38

N/N*=0,75 N/N*=0,9

Рисунок 2 - Микроструктуры сплава АМг61, на примере образца полученного вдоль направления наплавки при амплитуде напряжения σmax = 110 МПа (х100)

В процессе усталостного нагружения сплава АМг5 наблюдается появление на микроструктуре большого количества микротрещин вблизи пор, образовавшихся в процессе наплавки. Структурные изменения в твердом растворе алюминия при увеличениях до х500 практически не наблюдаются. Образование трещин во всем диапазоне температур наблюдается при наработке материала порядка 0,55 при больших амплитудах и 0,9 при малых амплитудах.

Согласно оптическим исследованиям зоны образования макротрещины в материале, макротрещина с момента ее появления (кривая 1 рис. 3а) до полного разрушения (кривая 2 рис. 3а) растет не равномерно, наиболее интенсивный рост трещины наблюдается после наработки порядка 0,95.



а) б)

Рисунок 3 - Зависимость количества циклов до: 1 – появления магистральной трещины, 2 – разрушения образца для сплава АМг5 (а) и средняя скорость роста трещины в зависимости от приложенного напряжения

Зависимость начальной скорости роста трещины (Vтр.ср.) приведена на рис. 3б в зависимости от амплитуды напряжений в цикле. Установлено, что при увеличении амплитуды напряжения в цикле при оценке долговечности сплава АМг5, наблюдается постоянная средняя скорость роста трещины до амплитуды напряжения порядка 95МПа, а при амплитудах в цикле выше 95МПа наблюдается значительное увеличение средней скорости роста трещины, особенно при амплитудах напряжений выше предела текучести сплава, что коррелирует с результатами исследования на других сплавах.

Проведенное исследование усталостного разрушения сплава АМг5, полученного по технологии WAAM, позволило установить следующие основные закономерности:

Направление вырезки образцов (вдоль или поперек направления наплавки) не оказывает существенного влияния на усталостные характеристики. Анизотропия свойств выражена слабо: разница в сопротивлении усталости не превышает 7%, а пределы выносливости составляют 70 МПа и 68 МПа для продольного и поперечного направлений соответственно.

Снижение температуры в исследованном диапазоне не оказывает значительного воздействия на усталостные свойства сплава.

Ключевым фактором, инициирующим усталостное разрушение, является образование микротрещин вблизи пор, возникших в процессе аддитивного выращивания. Структурные изменения в твердом растворе на микроуровне незначительны.

Рост макротрещины происходит неравномерно. Наиболее интенсивная стадия роста наблюдается на заключительном этапе нагружения (после наработки порядка 0,95 от общего числа циклов до разрушения).

Установлен критический уровень амплитуды напряжения (≈95 МПа), при превышении которого средняя скорость роста трещины резко возрастает, особенно при напряжениях выше предела текучести сплава.

Таким образом, сплав АМг5, полученный по технологии WAAM, демонстрирует слабовыраженную анизотропию усталостных свойств, а его долговечность в условиях циклического нагружения в значительной степени определяется наличием пор и поведением трещин при высокоамплитудных нагрузках.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ № 25-19-00534 "Разработка научных основ усталостного разрушения послойно модифицированных композиционных материалов, полученных аддитивной электродуговой наплавкой".

Список литературы:

1. K.E.K. Vimal, M. Naveen Srinivas, Sonu Rajak Wire Arc Additive Manufacturing Of Aluminium Alloys: A Review // Materials Today: Proceedings. - 2021. - №2. - С. 1139-1145.

2. А.В. Яковлев*, Г.С. Лебедев, О.Р. Лузанов, Е.В. Сергеева Перспективы И Технология Развития Waam // Актуальные Проблемы Космонавтики. - 2022. - №1. - С. 560-563.

3. Куйчиев О. Р. Анализ Усталостного Разрушения Алюминиевых Сплавов, Применяемых В Авиастроении И Автомобильной Промышленности, При Высоких Циклических Нагрузках // Экономика И Социум. - 2024. - №9. - С. 569-572.

4. А. О. Коротеев, Н. М. Шукан, А. В. Клименкова, А. Н. Михейкина, А. А. Лопатина Особенности Формирования Микроструктуры Сплавов Al-Si При Аддитивном Синтезе На Базе Дуговых Сварочных Технологий (Waam) С Управлением Мощностью Тепловложения // Вестник Белорусско-Российского Университета. - 2024. - №2. - С. 26-35.