

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/329

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В ИЗДЕЛИИ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО
СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-
ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

¹Гурьянов Д.А., ¹Фортуна С.В., ¹Калашников К.Н., ¹Осипович К.С.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Жаропрочные сплавы на основе никеля (или суперсплавы) применяют для производства сложных и ответственных деталей горячего тракта современного газотурбинного двигателестроения авиационного и энергетического назначения. В настоящее время известны такие дефекты в материале изделий из суперсплавов как, разориентированные зерна, цепочки фреклов, рекристаллизационные зерна, большеугловые и малоугловые границы, поры, блочная структура. Наличие большеугловых границ зерен ведет к интенсивному межкристаллитному окислению, что в свою очередь приводит к образованию самых опасных дефектов в виде трещин. Данному дефекту подвержены сплавы с низким содержанием углерода, т.к. углерод является упрочнителем границ. Фреклы – строчки равноосных зерен в междендритном пространстве, как правило вытянутых в направлении кристаллизации. Образуются фреклы из-за конвективной турбулентности расплава - сбоя монотонного дендритного роста, сопровождающегося завихрением расплава [1]. Ориентация зерен фреклов хаотична и не имеет связи с ориентацией дендритов. В работе [2] показано, что, в основном, фреклы образуются при низких скоростях охлаждения, при которых формируется крупночешуйчатая дендритная структура с расстоянием между осями дендритов первого порядка больше 300 мкм. Фреклы оказывают вредоносное влияние на коррозионные и механические свойства материала. Блочная структура – является следствием азимутальных и аксиальных разориентировок в процессе направленного роста. Изменение аксиальной ориентации может быть связано с изгибом осей дендритов 1-го порядка в вдоль направления температурного градиента, тогда как изменение азимутальной ориентации может быть вызвано закручиванием дендритной оси 1-го порядка крутящим моментом, возникающим вследствие взаимодействия соседних дендритов в процессе роста [1]. Согласно [3] поры в жаропрочных никелевых сплавах можно разделить на три типа: кристаллизационные, гомогенизационные и деформационные. Кристаллизационные поры имеют неправильную форму, повторяющую вид междендритного пространства, и располагаются на малоугловых границах. Данные поры образуются из-за того, что в процессе роста, оси дендритов 2-го порядка перекрывают междендритное пространства и тем самым препятствуют подтоку расплава.

Применение аддитивной технологии позволяет избежать дефектов, свойственных литьевому производству. А применение именно проволочной аддитивной технологии позволяет избежать дефектов, свойственных порошковому подходу. Не смотря на данные преимущества, в современной литературе недостаточно рассмотрены особенности формирования дефектов в жаропрочных сплавах, полученных методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии.

В данной работе методом аддитивной электронно-лучевой технологии получили однослойные дорожки никелевого сплава, нанесенные на стальную подложку. Исходным материалом служили прутки суперсплава ЖС6У и подложка в виде листового проката из аустенитной стали 12Х18Н9Т с водяным охлаждением. Образцы получали на установке, описанной в работе [4]. В ходе выполнения работы были получены четыре образца. Ток пучка электронов и скорость перемещения рабочего стола (скорость печати) были варьируемыми параметрами электронно-лучевого аддитивного процесса (см. Таблицу 1).

Полученные изделия характеризуются такими макродефектами как, отслоение нанесенного материала от подложки (Рис. 1-а), растрескивание и пористость в области интенсивного перемешивания стали с никелевым сплавом (Рис. 1-б), наличие трещин на границах колоний дендритов (Рис. 1-в). Отслоение нанесенного материала от подложки вероятнее всего происходит из-за деформаций, вызванных различием коэффициентов

Секция 7. Аддитивные технологии формирования материалов, изделий и конструкций с иерархической структурой

температурного расширения. Растрескивание по границам колоний дендритов может происходить по нескольким причинам: в следствии межкристаллитного окисления, вызванного наличием большеугловых границ; из-за закупоривания междендритного пространства карбидами, откуда в процессе кристаллизации развиваются трещины; различием скорости роста колоний дендритов с разными кристаллографическими ориентациями. Появление трещин и пор в области активного перемешивания стали с никелевым сплавом трудно поддается интерпретации, т.к. необходимо учитывать процессы образование дефектов не только отдельно взятых материалов, но и их взаимного влияние.

Таблица 1. Параметры электронно-лучевого аддитивного процесса

Маркировка образца	Ток пучка I, мА	Скорость перемещения стола, мм/мин
1	40	150
2	40-60	50
3	60	50
4	53-60	100

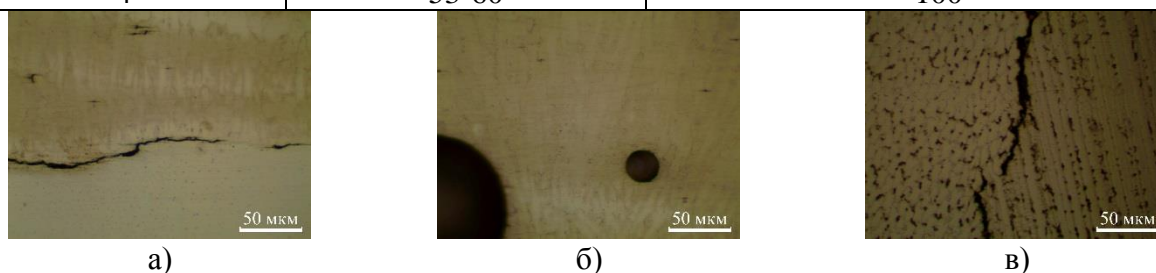


Рис. 1. Дефекты в никелевом сплаве, полученном методом электронно-лучевой аддитивной технологии

В исследуемом материале не было обнаружено фреклов, а расстояние между осями дендритов первого порядка не превышало 20 мкм, что говорит о высоком значении скорости охлаждения. Блочная структура, характерная для литых изделий, не выражена в материале, полученном методом электронно-лучевой аддитивной технологии. И можно предположить, что присутствие аксиальных и азимутальных разориентировок колоний дендритов минимально. В силу того, что наплавочный материал подавался в виде прутков, а не порошка, в нем не обнаружено усадочных пор, характерных для порошковых аддитивных технологий. По этой же причине нет и гомогенизационных пор, и, следовательно, нет необходимости проводить горячее изостатическое прессование.

1. Епишин А.И. Структура, анизотропия физико-механических свойств и механизмы высокотемпературной ползучести монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. // дис. на соискание уч. ст. д.ф.-м.н. Москва. 2007.
2. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов // М.: Машиностроение. 1997. С. 336
3. Epishin A., Brückner U., Portella P. D., Link T. Influence of Small Rhenium Additions on the Lattice Spacing of Nickel Solid Solution // Scripta mater. 2003. V. 48. P. 455-459.
4. Kalashnikova T. A., Khoroshko E. S., Chumaevskii A. V., and. Filippov A. V. Surface morphology of 321 stainless steel obtained by electron-beam wire-feed additive manufacturing technology // AIP: Conference Proceedings. 2018. V. 2051, 020114.