

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00228.

Список литературы

1. Fomin Vladimir, Rezaev Roman, Schmidt Oliver. Tunable Generation of Correlated Vortices in Open Superconductor Tubes // Nano letters. 2012. – Volume 12, Number 3. – 1282-1287.
2. Alstrøm, T. S., Sørensen, M. P., Pedersen, N. F., & Madsen, S. Magnetic Flux Lines in Complex Geometry Type-II Superconductors Studied by the Time Dependent Ginzburg-Landau Equation // Acta Applicandae Mathematicae. 2010. – 115(1). – pp. 63-74.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, СФОРМИРОВАННОЙ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ

А.С. ФОРТУНА¹, Е.Г. АСТАФУРОВА²

¹ Томский политехнический университет

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: anastasya_fortuna@mail.ru

В процессе производства изделий аддитивными методами формируется сложная иерархическая микроструктура. Из-за большого количества факторов, воздействующих в процессе печати на изделие, предсказать вид микроструктуры и механические свойства конечного изделия достаточно сложно. Получаемая при аддитивном росте микроструктура требует изучения самыми различными методами. Целью данной работы являлось выявление особенностей микроструктуры аустенитной нержавеющей стали, формируемой в процессе проволочной электронно-лучевой наплавки, методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Процесс наплавки осуществлялся на лабораторной установке для проволочной электронно-лучевой печати в вакууме. Наплавку проводили в одном направлении (каждый новый слой начинался и заканчивался там же, где предыдущий). В качестве наплавляемого материала использовали стальную сварочную проволоку марки AISI 304 (<0,03% C, 19-20% Cr, 9-11% Ni, 0,65-1% Si, 1-2,5% Mn, Fe ост.) диаметром 1 мм. Подложка, на которую производили наплавку, была изготовлена из низкоуглеродистой стали. Полученная заготовка имела вид стенки с размерами 100x5x30 мм. Для исследования микроструктуры перпендикулярно направлению печати были вырезаны плоские образцы в верхней и нижней частях заготовки. Фольги для ПЭМ исследований готовили стандартными методами путем электролитического травления в растворе хлорной кислоты в спирте. Исследование микроструктуры проводили стандартными методами ПЭМ (микроскоп JEOL 2100) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (энергодисперсионный детектор Inca X-act, Oxford Instruments).

На рисунке 1 представлены характерные ПЭМ-изображения микроструктуры наплавленного образца в разных частях заготовки. Изображения получены в режиме сканирующей просвечивающей электронной микроскопии. Вне зависимости от положения относительно подложки и начала печати слоя, микроструктура стали является двухфазной: по границам основной фазы располагаются ламели (ветви) дендритов другой фазы. Зёрна основного материала представляют собой аустенит (γ -фаза), а лежащие на границах с ними ламели – высокотемпературный феррит (δ -фаза). Толщина ламелей феррита достигает 1-2 мкм, длина – несколько микрометров. При помощи энергодисперсионного анализа было установлено, что ламели феррита обогащены по хрому и обеднены по никелю, а области аустенита, напротив, обогащены никелем и содержат мало хрома. По границам феррита и

аустенита были обнаружены различные неметаллические включения, которые, согласно энергодисперсионному анализу, представляли собой нитриды и сульфиды различного состава. Их образование связано с наличием в проволоке различных металлургических примесей.

В аустените вблизи подложки присутствуют единичные двойники, их ширина достигает величины сто нанометров. В верхней части заготовки двойники экспериментально не были выявлены. В структуре образца, полеченного из верхней части заготовки в конце роста слоев методом ПЭМ наблюдали единичные дефекты упаковки. Данные особенности говорят о повышении энергии дефекта упаковки (ЭДУ) при движении вверх от подложки. Это было подтверждено при помощи спектров, полученных энергодисперсионным методом из областей вблизи подложки и вверху стенки. Расчёт ЭДУ производили по эмпирической формуле, приведённой в работе [1], связывающей значение ЭДУ с химическим составом стали.

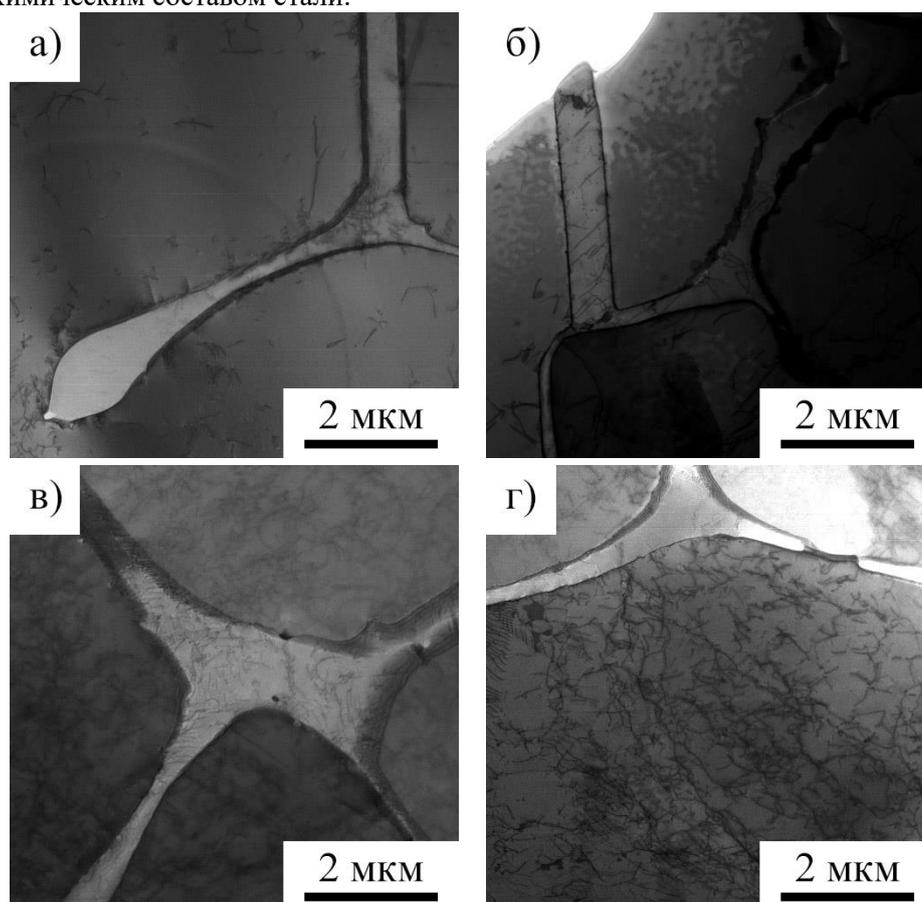


Рисунок 1 – Микроструктура наплавленного образца, полученная методом ПЭМ: а) верх, начало печати; б) верх, конец печати, в) низ, начало печати; г) низ, конец печати

Дислокационная структура аустенита зависит от близости к подложке. Вблизи подложки дислокационная структура однородная: не образуется скопления дислокаций и ячеек, нет выраженной планарности структуры. Скалярная плотность дислокаций в области начала наплавления каждого слоя составляет $2,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, окончания наплавления - $3,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Вверху стенки дислокационная структура носит выраженный планарный характер. Плотность дислокаций области начала наплавления каждого слоя ниже, чем в нижней части заготовки - $0,8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, для области окончания наплавления слоев -

$3,0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Распределение дислокаций в ламелях феррита носит планарный характер, плотность дислокаций в них сопоставима с показателями для аустенита.

Таким образом, после аддитивного роста стальной заготовки методом проволоочной электронно-лучевой наплавки в ней формируется существенно неоднородная микроструктура, которая зависит от термической истории каждой части заготовки и ее элементного состава.

Автор работы выражает благодарность Е.Г. Астафуровой, В.А. Москвиной, Г.Г. Майер и С.В. Фортуна за помощь в проведении исследований. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» (ИФПМ СО РАН).

Список литературы

1. Meric de Bellefon G., van Duysen J. C., Sridharan K. Composition-Dependence of Stacking Fault Energy in Austenitic Stainless Steels through Linear Regression with Random Intercepts // Journal of Nuclear Materials. 2017. Vol. 492. P. 227–230.

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДА (ПИ)

С.В.ПАНИН^{1,2}, Д.О.ЦЗЯНКУНЬ², Л.А.КОРНИЕНКО¹, В.О.АЛЕКСЕНКО^{1,2}, Л.Р.ИВАНОВА¹

¹ ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

² ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Полиимид (ПИ) – высокотехнологичный высокотемпературный полимерный материал, который благодаря своим ценным свойствам применяется в машиностроении, автомобильной, горнодобывающей, химической отраслях, а также в медицине (например, для изготовления эндопротезов, межпозвонковых дисков и т. д.). ПИ обладает по сравнению с другими полимерами высокими характеристиками твердости, жесткости, износостойкости и прочности, показывает повышенную стабильность размеров и ударопрочность даже при длительных высокотемпературных нагрузках. Он предназначен для работы в условиях повышенного давления, химически агрессивных сред и имеет достойную стойкость к гидролизу, а также хорошие электроизоляционные свойства [1,2]. Быстрое развитие современной науки и техники диктует высокие требования к материалам, в частности, к износостойкости антифрикционных материалов в различных условиях эксплуатации. В этом случае основной задачей применения композитов на основе полимеров является снижение коэффициента трения и износа при сохранении достаточно высоких физико-механических показателей композиции.

Снижение износа полимера за счет твердосмазочного наполнителя один из путей расширения номенклатуры антифрикционных материалов для трибоузлов в машиностроении и медицине. Например, политетрафторэтилен, дисульфид молибдена, графит и др. [3,4].

В работе использовали порошок ПИ (SolverPI-Powder 1600) со средним размером частиц 16 мкм. В качестве наполнителей использовали частицы политетрафторэтилена (ПТФЭ) (\varnothing 6-20 мкм) в объеме 10 - 20 вес. % и дисульфида молибдена MoS_2 (\varnothing 1÷7 мкм) в объеме 5-20 вес. %. Образцы для испытаний получали методом горячего прессования при давлении 15 МПа и температуре 370 °С. Механические характеристики определяли при разрывных испытаниях на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов в форме двойной лопатки (ГОСТ 11262-80). Испытание образцов на изнашивание в режиме сухого трения проводили по схеме «шар-по-дису» при нагрузке $P=5$ Н и скорости скольжения $V=0,3$ м/с на трибометре CSEM CH-2000 в соответствии с ASTM G99. При трибоиспытаниях использованы два типа шарика-контртела: из стали