

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Физическая мезомеханика.
Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина

**в рамках
Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ АДДИТИВНО-ИЗГОТОВЛЕННОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

¹Москвина В.А., ¹Астафурова Е.Г., ²Рамазанов К.Н., ¹Астафуров С.В., ¹Мельников Е.В.,

¹Майер Г.Г., ¹Панченко М.Ю., ¹Реунова К.А., ¹Рубцов В.Е., ¹Колубаев Е.А.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

²*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

С применением методов одноосного статического растяжения, световой и сканирующей электронной микроскопии экспериментально исследовано влияние ионно-плазменного поверхностного насыщения азотом на анизотропию механических свойств и механизма разрушения образцов хромоникелевой нержавеющей стали, полученных методом аддитивного электронно-лучевого производства металлических изделий. Для создания заготовок была выбрана проволока из нержавеющей стали марки AISI 321 (Fe-17,8Cr-9,7Ni-0,6Si-1,2Mn-0,9Ti-0,2Cu-0,08C, мас. %) диаметром 1,2 мм. Аддитивный рост заготовок проводили в условиях вакуума последовательным наплавлением 55 параллельных слоев на подложку из стального листа. Предварительный разогрев подложки и обеспечение адгезии осуществлялись с помощью первичного прохода электронного луча без подачи проволоки. Полученные заготовки имели форму вертикальных стенок размером 110×35×6 мм³. Электроэрозионной резкой из стальных стенок были вырезаны образцы для испытаний на одноосное растяжение в форме двойных плоских лопаток с размерами рабочей части 12×3×1,5 мм. Ввиду того, что аддитивно-изготовленные металлические изделия обычно обладают сильной анизотропией структуры и свойств, образцы из стенок были вырезаны в продольном и поперечном направлениях относительно слоев наплавки и движения электронного пучка. Часть образцов была подвергнута механическим испытаниям и исследована в состоянии непосредственно после аддитивного выращивания. Для установления влияния пост-производственной обработки, оставшая часть продольных и поперечных образцов была подвергнута ионно-плазменному азотированию при температуре 540°С в течение 12 часов на установке ЭЛУ-5 (Уфа). Аддитивно-изготовленные образцы азотировали в среде водорода и азота (H₂-30 %, N₂-70 %) при давлении рабочего газа 300 Па. Одноосное растяжение образцов до и после азотирования проводили при комнатной температуре с начальной скоростью деформации 5×10⁻⁴ с⁻¹.

Аддитивно-изготовленные стенки обладали неоднородной слоистой макроструктурой, которая обусловлена последовательным наплавлением каждого нового слоя на предыдущий без расплавления нижележащих слоев. Аддитивный рост заготовок способствовал формированию столбчатой крупнозернистой структуры, зерна вытянуты вдоль направления роста заготовки и поперечный диаметр зерна находится в диапазоне 0,1±0,5 мм. При плавлении стальной проволоки под действием электронного пучка в стенках сформировалась гетерофазная микроструктура, с преобладающей фазой γ-аустенита, в котором присутствуют дендриты δ-феррита. Элементный состав γ-фазы близок к исходному составу проволоки Fe-(16,5-17,5)Cr-(9,6-9,9)Ni (мас. %). Колонии дендритного δ-феррита преимущественно ориентированы вдоль направления роста стальной стенки (т.е. от нижней к верхней части). Анализ изображений, полученных методами световой и сканирующей электронной микроскопии, позволил установить, что толщина ветвей дендрита δ-феррита составляет 1,0–1,5 мкм. Согласно данным рентгеноспектрального микроанализа, δ-феррит обогащен по хрому и обеднен по никелю Fe-(20-22)Cr-(4,6-5,7)Ni (мас. %). Морфология дендритов δ-феррита не изменяется по высоте стенки, однако их плотность увеличивается по мере продвижения от нижней части заготовки к верхней. Эти данные подтверждают результаты магнитофазового анализа – содержание δ-феррита вблизи подложки составляет 10–15 %, при увеличении расстояния от подложки доля δ-феррита увеличивается до 20–23 %.

Секция 10. Аддитивные технологии формирования материалов, изделий и элементов конструкций с иерархически организованной структурой

Анизотропия структуры в разных масштабах хорошо коррелирует с анизотропией механических свойств и механизмов разрушения продольных и поперечных стальных образцов. Предел текучести поперечных образцов (с осью растяжения, совпадающей с направлением роста заготовки) меньше, однако пластические характеристики выше, чем у продольных образцов (с осью растяжения вдоль слоев наплавки). Стадийность кривых течения одинакова для продольных и поперечных образцов. Пост-производственная ионно-плазменная обработка способствует образованию поверхностного азотированного слоя в аддитивно-изготовленных образцах, не вызывает существенных изменений прочностных свойств при испытаниях на растяжение и способствует снижению пластичности. Ионно-плазменное азотирование способствует поверхностному упрочнению образцов – формированию композиционного поверхностного слоя (аустенит, феррит, нитриды различного состава) и увеличению поверхностной микротвердости аддитивно-изготовленных образцов независимо от их типа. Прирост микротвердости обусловлен фазовыми превращениями и изменением микроструктуры поверхности образцов в процессе пост-производственной обработки.

Независимо от типа аддитивно-изготовленных образцов (поперечные или продольные), микромеханизм разрушения поверхностных слоев в них изменяется от вязкого транскристаллитного к квазихрупкому разрушению с образованием плоских фасеток и сколов после азотирования. При этом центральная часть азотированных образцов разрушается по-прежнему транскристаллитно вязко. Изменения в микромеханизме разрушения поверхностного слоя обусловлены образованием твердого раствора азота в исходном аустените и феррите и формированием градиентной структуры с различной концентрацией азота по глубине в поверхностном слое, а также образованием нитридов при ионно-плазменной обработке.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.7.