

З.Е. Игнатъев, А.А. Шатульский
(ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный
университет имени П.А.Соловьёва)

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕСКОСТРУЙНОЙ
ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ И ВЫДЕРЖКИ
НА ГЛУБИНУ РЕКРИСТАЛЛИЗОВАННОГО СЛОЯ
В МОНОКРИСТАЛЛИТНЫХ ОТЛИВКАХ
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Создание новых газотурбинных двигателей (ГТД) для авиации, а также транспортных и стационарных газотурбинных установок (ГГУ) во многом определяется разработкой новых жаропрочных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами. Тяга двигателя, характеристики его экономичности и массогабаритные показатели зависят от температуры газа на входе в турбину и количества отводимой теплоты. Поэтому основная тенденция развития газотурбинных двигателей состоит в непрерывном увеличении температуры газа на входе в турбину. В свою очередь это требует повышения служебных характеристик материалов горячего тракта двигателя и прежде всего длительной прочности и термостойкости жаропрочных сплавов [1].

После литья монокристаллитные лопатки проходят несколько технологических операций, включая обрезку литников, пескоструйную очистку поверхности, травление, механическую обработку пера лопатки для обеспечения требуемых геометрических размеров. Однако в результате такой обработки на поверхности лопатки образуется наклепанный слой.

Склонность сплава к поверхностной рекристаллизации определяется его химическим составом и степенью совершенства монокристаллической структуры. Следует отметить, что монокристаллитные сплавы, содержащие в своем составе рений, менее склонны к поверхностной рекристаллизации. Монокристаллитные отливки с сильно развитой блочной субструктурой более склонны к рекристаллизации поверхностных слоев.

Отсутствие в составе монокристаллитных сплавов упрочнителей зёрен, в частности карбидов, боридных фаз и т.п. приводит к значительному снижению когезивной прочности границ рекристаллизованных зерен при высоких температурах. Это в свою очередь существенно снижает несущую способность рабочего сечения лопаток, особенно при длительных циклических испытаниях. Следует иметь в виду и масштабный эффект, заключающийся в том, что длительная прочность сплавов зависит от геометрических размеров образца: чем

меньше площадь поперечного сечения образца, тем ниже его длительная прочность [2].

Решение задачи влияния режимов предварительной пескоструйной обработки на толщину рекристаллизованного слоя и свойства изделий решали экспериментально. Три цилиндрических образца подвергались разным режимам пескоструйной обработки. Данные о режимах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы пескоструйной обработки образцов.

Номер образца	Давление, атм.	Время, с
1	1,5	60
2	3	60
3	5	60

После пескоструйной обработки образцы разрезались на части с целью дальнейших температурных испытаний. Режимы испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы температурных испытаний образцов

Режимы обработки	Давление, атм.	Режимы обработки	Давление, атм.	Режимы обработки	Давление, атм.
1 - $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\tau=2$ ч	1,5	4 - $T=1100^{\circ}\text{C}$, $\tau=2$ ч	1,5	7 - $T=1200^{\circ}\text{C}$, $\tau=2$	1,5
	3		3		3
	5		5		5
2 - $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\tau=12$ ч	1,5	5 - $T=1100^{\circ}\text{C}$, $\tau=12$ ч	1,5	8 - $T=1200^{\circ}\text{C}$, $\tau=12$ ч	1,5
	3		3		3
	5		5		5
3 - $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\tau=24$ ч	1,5	6 - $T=1100^{\circ}\text{C}$, $\tau=24$ ч	1,5	9 - $T=1200^{\circ}\text{C}$, $\tau=24$ ч	1,5
	3		3		3
	5		5		5

Исходя из полученных данных, можно выявить ряд общих закономерностей развития поверхностной рекристаллизации монокристаллитных отливок из жаропрочных никелевых сплавов.

1. При температуре выдержки 1000°C рекристаллизации не происходит, независимо от давления обработки поверхности. Установлено, что размер упрочняющей фазы в поверхностном слое отливок составляет $0,1...0,4$ мкм. Температура начала рекристаллизации ниже температуры солвус, т.е. находится в двухфазной области. Скорость рекристаллизации в двухфазной области невелика, так как миграция рекристаллизованных границ тормозится частицами γ' -фазы, выделениями эвтектики γ/γ' и порами.

2. При температуре выдержки 1100°C упрочняющая фаза начинает растворяться, при этом ее размер составляет менее $0,1$ мкм. Судя по всему, упрочняющая фаза уже не может служить барьером для ми-

грации рекристаллизованных границ. Кроме того, выделения эвтектической фазы, наблюдаемые при времени выдержки $\tau=2$ ч, отгесняются вглубь материала на некоторое расстояние.

3. При увеличении температуры выдержки увеличивается глубина слоя растворенной γ' -фазы и, соответственно, рекристаллизованного слоя. Bing ZHANG и др. в работе [3] получили зависимость глубины рекристаллизованного слоя от температуры выдержки, что представлена на Рис. 1. Результаты проведенных экспериментов лишь подтверждают данную зависимость.

4. Давление прессования при пескоструйной обработке поверхности практически никак не влияет на процесс рекристаллизации. Более того, даже незначительное давление (1,5 атм.) при условии длительной выдержки (более 2 ч) и температуры более 1000°C начинается процесс рекристаллизации.

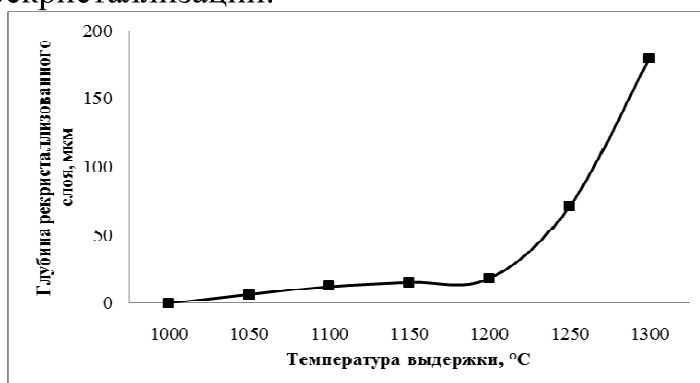


Рисунок 1 – Зависимость глубины рекристаллизованного слоя от температуры выдержки

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов можно сказать, что для монокристаллитных отливок можно применять пескоструйную обработку, но только при температуре эксплуатации не выше 1000°C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качалов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – С. 5–7.

2. Шатульский А.А. Голубенцев А.В. Повышение выносливости рабочих лопаток газотурбинных двигателей на основе совершенствования технологии литья.- Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 6. С. 3-7.

3. Bing ZHANG, Xue-gang CAO, De-lin LIU, Xin-ling LIU Surface recrystallization of single crystal nickel-based superalloy// Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 23, Issue 5, May 2013, Pages 1286-1292.