

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Смирнов Г.В., Проничев Н.Д., Фадеев А.Ю., Демин М.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара.

Электрохимическая размерная обработка (ЭХО) занимает прочное место в технологических процессах изготовления отечественных деталей ГТД из труднообрабатываемых сплавов. Включение ее в техпроцесс способствует получению у обрабатываемых деталей более высоких эксплуатационных свойств. Долгое время ЭХО не являлась окончательным методом обработки для деталей, имеющих высокие точностные характеристики из-за недостаточно высокой точности данного метода. Однако накопление и углубление знаний в теории процесса способствовало появлению более совершенных способов реализации метода ЭХО. Поэтому ЭХО стала применяться в качестве окончательного метода в техпроцессах деталей ГТД из труднообрабатываемых сплавов. По этой причине повысились требования к состоянию поверхностного слоя после ЭХО, а также появилась необходимость в надежных методах, оценивающих это состояние. Сказанное выше относится к труднообрабатываемым жаропрочным сплавам, в частности хромоникелевым сплавам. Хромоникелевые сплавы имеют сложный состав и содержат легирующие компоненты, которые плохо растворяются электрохимическим методом. Следует отметить также сложный фазовый состав сплавов. Микроструктура сплава ЭП718 представляет собой совокупность крупных зерен γ - фазы (матрица) с вкрапленными в них частицами γ' - фазы. Размеры зерен достигают 30...50 мкм, размеры же дисперсной γ' - фазы обычно составляют 0,5...0,05 мкм. В процессе выделения γ' - фазы при термической обработке происходит существенное перераспределение хрома (а также других элементов) между фазами, и его содержание в γ' - фазе находится на уровне 1...2%. Сплав имеет следующий фазовый состав :

γ фаза + γ' фаза + карбидная фаза + боридная фаза ;

γ фаза - это твердый раствор на основе Ni Fe - Cr ; γ' фаза включает сложную комбинацию элементов (Ni, Cr, Fe)₃(Al, Ti, Nb, Mo, W); карбидная фаза имеет основу (Nb, Ti)C; боридная фаза - (Mo, W, Cr)₃B₂.

Сложный структурный и фазовый состав хромоникелевых сплавов, включения карбидной и боридной фаз, наличие протяженных границ с измененным электрохимическими свойствами должны существенно влиять на механизм формирования микрогеометрии поверхностного слоя. Этот слой формируется в специфических

условиях, существенно отличающихся от других методов обработки. При отсутствии силового и теплового воздействия на обрабатываемую поверхность в процессе анодного растворения проявляется избирательность травления различных фаз, границ зерен, включений и т.д. В зависимости от степени проявления этих воздействий изменяется морфология обработанной поверхности, что в свою очередь оказывает большое влияние на эксплуатационные характеристики деталей.

При оценке приемлемости ЭХО как метода окончательной обработки поверхностей деталей используют различные методы измерения шероховатости обработанной поверхности. Проведенный анализ выбора метода измерения шероховатости после ЭХО показал, что это самостоятельная достаточно сложная задача. Наш выбор был ограничен тремя, наиболее приемлемыми методами измерения шероховатости.

1. Измерение на профилографе-профилометре является современным методом, соответствует фактическому диапазону шероховатости, однако в условиях ЭХО при наличии растравливания границы зерна с шириной 2...3 мкм алмазная игла не фиксирует эти дефекты. Кроме того, при измерении шероховатости поверхностей лопатки не обеспечивается доступность всех точек для щупового прибора из-за значительной кривизны пера.

2. Измерение оптическим методом на микроскопе Линника (МИС-11) является устаревшим, имеет недостаточную точность и допустимо лишь при шероховатости 1,8...2,4 мкм, что не соответствует диапазону заданному в чертеже лопатки.

3. Измерение шероховатости на интерферометре МИ-4 возможно лишь на плоских образцах, но при этом имеются ограничения. Если обработанная поверхность имеет темную пленку, то интерференционная картина теряется. Для блестящих образцов обработанных электрохимическим методом интерференционная картина исчезает на границе зерна.

Поэтому для решения проблемы выбора метода измерения шероховатости после окончательной ЭХО необходимо исследовать границы зерна, изучить их морфологию и на основании полученных результатов исключить противоречия различных методов измерения. С этой целью нами была разработана методика комплексного изучения поверхностного слоя после электрохимической обработки хромоникелевых сплавов в различных электролитах. Методика основана на использовании визуальных методов, позволяющих фиксировать открытые структуры, не затененные различными пленками. Она включает проведение исследований формирования поверхностного слоя в связи со структурой металла с целью качественной оценки морфологии поверхности. При этом проводится

анализ снимков поверхности, сделанных на металлографическом и электронном растровом микроскопах:

а) профильного среза образцов, обработанных методом импульсной ЭХО;

б) после ЭХО без дополнительного травления, исследования на электронном микроскопе;

Подготовка микрошлифов проводилась по методике, отличающейся от стандартной тем, что в ней предусматривались специальные меры для четкой проработки кромки профильного среза образцов. Для получения наглядной качественной картины на поверхность образца наносилась специальная риска, являющаяся своего рода стандартом. Сравнение с ней поверхностного слоя после обработки позволяет оценить возможное его изменение.

Для количественной оценки микронеровностей в связи со структурой сплавов предусматривалось снятие профилограмм поверхности после ЭХО при строгом фиксировании трассы шупа измерительного прибора на образце и совмещении полученной профилограммы с фотографией микроструктуры. Важным условием поведения этих условий ЭХО, при которых на поверхности отсутствует окисная пленка и хорошо видна микроструктура сплава без дополнительного протравливания.

Измерение микронеровностей производилось по профилограммам, которые снимались на профилографе-профилометре модели 250. При этом учитывалось условие совмещения профилограммы и фотографии микроструктуры в одинаковых масштабах. Важным условием точного совмещения профиля микронеровностей и микроструктуры поверхности является нанесение реперных точек и рисок.

Исследование динамики формирования микронеровностей при импульсной ЭХО проводилось путем послойного снятия металла в фиксированной точке поверхности, имеющей структурную неоднородность. На обрабатываемой поверхности выбиралась характерная зона и отмечалась специально нанесенными реперными точками, которые не стравливаются (сохраняются) в течении всего времени исследования. Проводилась импульсная электрохимическая обработка поверхности в течении 3...5 с, при этом с поверхности снимался слой 0,05...0,5 мкм. Далее поверхность исследовалась на электронном микроскопе РЭМ-100. Полученная картина фиксировалась на фотобумаге и эксперимент повторялся. Электрохимическое послойное стравливание поверхности по шагам проводилось до полного сглаживания микронеровности. Все исследования проводились на специальных образцах, изготовленных из материалов, которые

непосредственно используются в производстве лопаток на ГТД (сплав ЭП718 сырой и термообработанный).

Для проведения экспериментов в качестве электролитов использовались водные растворы калиевой и натриевой селитры, хлористого натрия, а также перхлората натрия.

Проведенные микроструктурные исследования (рис.1) показали, что на профильных микрошлифах кромка проработана достаточно четко. После травления хорошо видна сетка границ и карбидная фаза. В точках выхода границы зерна на поверхность, обработанную электрохимическим методом, видны темные переходные зоны, которые могут быть результатом протравливания границы при импульсной ЭХО, следствием травления микрошлифа в кислоте или представлять карбидные включения на границе.

Окончательное заключение о состоянии границ по этим снимкам дать невозможно. На фотографиях (рис.2.-3.) показана поверхность образца из сплава ЭП718 обработанная электрохимическим методом без дополнительного травления в кислоте. Особенностью является то, что подобраны такие условия ЭХО, при которых не образуется пленки, поверхность остается блестящей, хорошо видны границы зерна и фазовый состав сплава. На поверхность механическим путем была нанесена контрольная риска, которая позволяет дать более достоверную качественную оценку состояния границ зерна после импульсной ЭХО. Анализ этих фотографий показывает, что большинство границ рельефно выступают над основной матрицей, карбидные включения внутри зерна также видны в виде единичных выступов.

На рис.4. показана картина обработанной поверхности с четко проработкой микроструктуры, нанесенными контрольными рисками, реперными точками. Эта картина совмещена с профилограммой поверхности, которая снималась по заданной траектории при том же горизонтальном увеличении. Таким образом эти исследования позволяют дать количественную оценку всем элементам микрорельефа по линии трассирования. Анализ совмещенной картины микрошлифа и профилограммы показывает, что границы зерна выступают до 0,5 мкм, отдельные карбидные включения выступают над матрицей до 0,7 мкм, имеются впадины до 0,3 мкм, которые расположены в различных точках, не имеют тесной связи с границами зерна и могут быть результатом подтравливания и выпадения карбидных фаз вне зависимости от измельчения зерна вызванного термообработкой. Введение термообработки приводит к измельчению зерна и перераспределению карбидов и боридов, однако характеристики микрогеометрии поверхностного слоя после ЭХО не меняются.

С помощью электронного микроскопа исследовалась поверхность после импульсной электрохимической обработки в заданной фиксированной точке. Сделано восемь снимков через каждые 4...5 с обработки (рис.5). Полученная картина показывает динамику растворения поверхности. Для исследования была выбрана зона на границе 3-х зерен с характерными карбидными включениями. По мере растворения граница зерна перемещается, т.к. она расположена под углом к плоскости обработки. Можно предположить, что в результате подтравливания матрицы возможна дезинтеграция небольшой части карбида, однако ранее методика не позволяет зафиксировать этот момент с полной достоверностью. Косвенным подтверждением такого механизма является наличие небольших ямок в матрице в месте растворения карбида.

Проведенные исследования с применением комплексной методики позволяют сделать заключение о том, что механизм формирования микрогеометрии при импульсной электрохимической обработке сплавов типа ЭП718ИД в пассивирующих электролитах близок к тому, который характерен для сплавов с неоднородной структурой.

При внедрении круговой окончательной импульсной электрохимической обработки лопаток компрессора из хромоникелевых сплавов необходимо обеспечить шероховатость поверхности 0,08...0,16 мкм, а также исключить растравливание по границам зерен. Решение этой задачи возможно лишь на основе знания механизма формирования шероховатости и основных закономерностей растворения таких материалов.

Принимая во внимание эти результаты, рассмотрим процесс обработки поверхности с учетом различных скоростей растворения карбидов, боридов и матрицы основного материала. Ранее было установлено, что карбиды и бориды, которые располагаются по границам зерен и в виде отдельных включений по зерну, растворяются меньшими скоростями, чем основной материал. После того, как основной материал вокруг карбида вытравится возможно выпадение оставшейся частички.

Следовательно, микронеровности будут формироваться на поверхности за счет выступающих карбидов и боридов как по правой границе зерна, так и в виде единичных выступов по зерну. При этом максимальная высота единичной неровности будет сформирована к моменту выпадения, т.е. включение открывается на поверхности и растет по мере растворения до того момента, когда матрица будет вытравлена до нижней границы. Из рассмотренного механизма растворения можно заключить, что высота микронеровностей определяется размерами карбидов, величиной зерна (протяженностью

границы) и разностью скоростей растворения включения и основной матрицы.

Таким образом, предложенная комплексная методика исследования поверхности после электрохимической обработки на примере хромоникелевого сплава ЭП718ВД позволила во-первых, исключить противоречия в толковании результатов касательно растравливания по границам зерен. Во-вторых, благодаря этому факту удалось доказать отсутствие растравливания по границам зерен после ЭХО у данного сплава после обработки его во всех исследуемых электролитах. В-третьих, и это главное, доказана эффективность данной методики, ее универсальность при оценке всех параметров, оказывающих влияние на формирование качественных характеристик поверхностного слоя, по состоянию которых принимается решение о возможности ЭХО, как метода обработки в технологических процессах деталей ГТД.

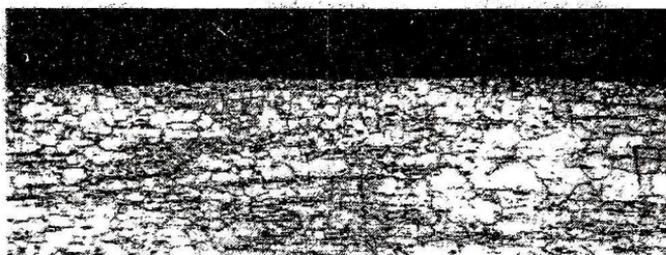


Рис.1. Микроструктура сплава ЭП 718 после травления в кислоте.



Рис.2. Микроструктура сплава ЭП 718 после электрополировки без модуляции луча.

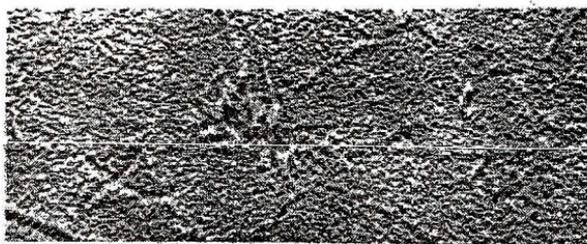


Рис.3. Микроструктура сплава ЭП 718 после электрополировки с модуляцией луча.



Рис. 4. Микроструктура сплава ЭП 718 обработанного в электролите 10% NaClO с нанесенными контрольными рисками.



а)



б)



а)



б)

Рис. 5.1.
Микроструктура сплава ЭП 718 (I этап)
а - с модуляцией луча;
б - без модуляции луча.

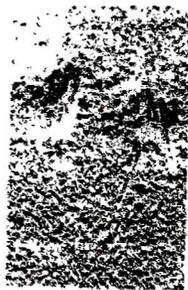
Рис. 5.2.
Микроструктура сплава ЭП 718 (II этап)
а - с модуляцией луча;
б - без модуляции луча.



а)



б)



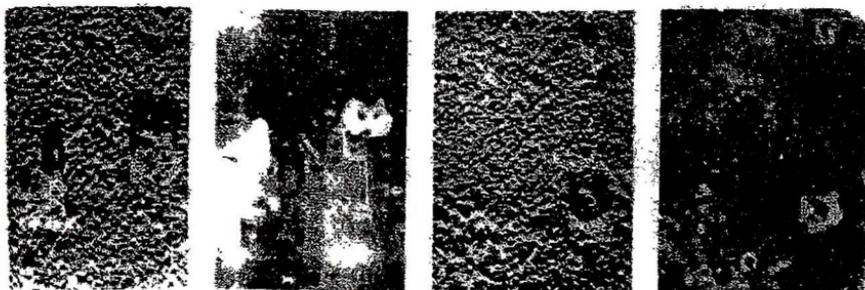
а)



б)

Рис. 5.3.
Микроструктура сплава ЭП 718 (III этап)
а - с модуляцией луча;
б - без модуляции луча.

Рис. 5.4.
Микроструктура сплава ЭП 718 (IV этап)
а - с модуляцией луча;
б - без модуляции луча.



а)

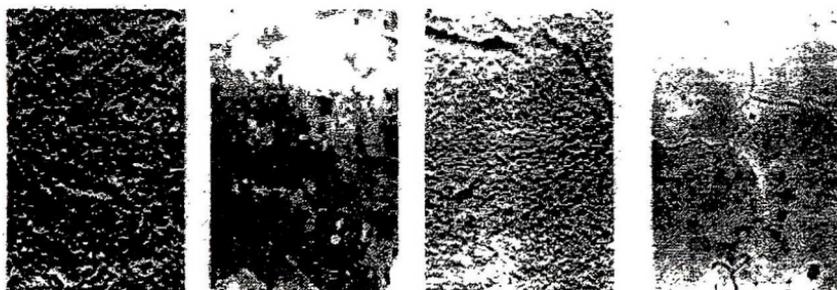
б)

а)

б)

Рис. 5.5.
Микроструктура сплава ЭП 718 (V этап).
 а - с модуляцией луча;
 б - без модуляции луча.

Рис. 5.6.
Микроструктура сплава ЭП 718 (VI этап).
 а - с модуляцией луча;
 б - без модуляции луча.



а)

б)

а)

б)

Рис. 5.7.
Микроструктура сплава ЭП 718 (VII этап).
 а - с модуляцией луча;
 б - без модуляции луча.

Рис. 5.8.
Микроструктура сплава ЭП 718 (VIII этап).
 а - с модуляцией луча;
 б - без модуляции луча.