

УДК 539.3

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ 12Х15Г9НД ПОСЛЕ ЗАЛЕЧИВАНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ**

Сугоняко И.С.<sup>1</sup>, аспирант, I курс, Кукуджанов К.В.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., научный  
сотрудник, Халикова Г.Р.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент

Научный руководитель: Дмитриев С.В.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет  
г. Уфа

<sup>2</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН  
г. Москва

Во многих отраслях промышленности существует проблема разрушения конструкций, подвергающихся циклическому нагружению. Причиной разрушения часто служит образование и последующий рост усталостных трещин. Поэтому для увеличения срока эксплуатации конструкции актуально разработать методики заживления усталостных трещин и профилактики их образования. В настоящий момент существуют различные способы заживления трещин в полимерах, биоматериалах и керамических материалах, которые неприемлемы для металлов из-за прочной металлической связи атомов и низкой скорости диффузии [1]. Трещины в металлах и сплавах зачастую заживают методами термической и термомеханической обработки [2]. Для таких методов характерны нежелательные фазовые и структурные превращения в материале и ухудшение его механических свойств в связи с ростом зерна при повышенной температуре [3]. Другим недостатком является высокая трудоемкость, длительность и энергозатратность процесса термической и термомеханической обработки.

Альтернативой термической и термомеханической обработке является воздействие на металл постоянным или импульсным электрическим током. В то время как воздействие постоянного тока часто эквивалентно классической термообработке (отжигу), воздействие на металлы и сплавы коротких электрических импульсов высокой плотности улучшает их пластичность, вязкость, коррозионную стойкость и одновременно приводит к заживлению дефектов (трещин) [1, 4]. Заживление трещин при такой обработке происходит за счет концентрации электрического поля на вершинах трещины, что приводит к выделению джоулева тепла [5]. Это вызывает локальный нагрев металла в области вершины трещины, его тепловое расширение и его расплавление. Благодаря сжимающим механическим напряжениям происходит сближение краев трещины и заваривание пространства между ними расплавленным металлом. Микротрещины можно заваривать одиночным импульсом тока, в то

время как залечивание макротрещин происходит поэтапно – несколькими последовательными импульсами.

Целью данной работы было осуществление залечивания выращенных в лабораторных условиях макротрещин на пластинах из стали 12Х15Г9НД с помощью воздействия импульсов тока и изучение микроструктуры в области трещины.

В средней части пластины из стали 12Х15Г9НД размерами 120,0×18,2×0,7 мм электроискровым методом выполнили надрез размером 0,3×2,0×0,7 мм. Далее пластины с надрезом подвергли усталостному нагружению по методике [6] для выращивания макротрещин. Длина макротрещин в образцах составляла 5,75–8,85 мм. Далее образец закрепляли между двумя медными электродами, расстояние между которыми составляло 38 мм, и проводили электроимпульсную обработку с помощью генератора импульсных токов ГИТ-20-40. Режимы электроимпульсной обработки представлены в (таблице 1).

Таблица 1 – Режимы электроимпульсной обработки

Номер этапа	Максимальная плотность тока положительная/отрицательная (кА/мм <sup>2</sup> )	Число импульсов на каждом этапе	Длительность импульса (мкс)	Частота (кГц)
1	179/–110	2	111	13,3
2	211/–133	2	110	
3	453/–283	2	109	
4	1190/–556	3	107	
5	1383/–865	3	106	
6	1937/–1216	1	103	

Процесс залечивания трещины наблюдали с помощью оптического микроскопа Zeiss Axio. Исследование микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе Tescan Mira методом EBSD.

Электроимпульсная обработка позволила залечить часть трещины длиной 520 мкм, что составляет около 9 % от длины первоначальной трещины (5750 мкм). На последнем этапе воздействия импульсным током произошло образование кратера. Это связано с тем, что на участке от первоначальной вершины трещины до кратера проводимость материала между краями трещины восстанавливается, и трещина залечивается. Микроструктура участка с трещиной после залечивания импульсным током представлена на рисунке 1.

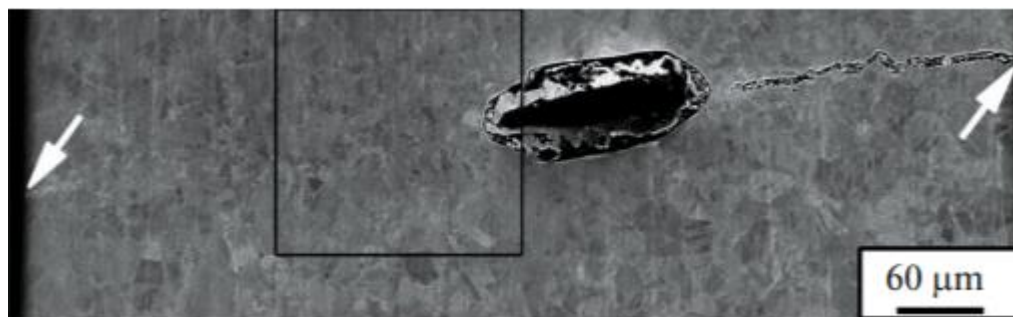


Рисунок 1 – Микроструктура участка с трещиной после заживления. Белыми стрелками показаны незалеченные участки начала и конца трещины. Черным квадратом выделена залеченная область, где был проведен EBSD анализ

На рисунке 2 представлены EBSD – карты области, залеченной импульсным током и выделенной квадратом на рисунке 1. Видно, что с обеих сторон от залеченной трещины внутри аустенитных зерен образовались области с развитой субструктурой, обозначенные буквой А на рисунке 2(а) и зеленым цветом на рисунке 2(б). В месте залеченной усталостной трещины образовалась неоднородная мелкозернистая микроструктура кристаллизационного происхождения. Наблюдается «шлейф» зерен, преимущественно вытянутых в направлении залеченной трещины с обеих сторон трещины, и структура, близкая к равноосной, в центре залеченной трещины между «шлейфами» с удлинёнными зёрнами, см. рисунок 2(а). Зона «шлейфа» с удлинёнными зёрнами и центральная зона с равноосными зёрнами, наблюдаемые в залеченной области вдоль краёв трещины, указывают на постепенное охлаждение расплава в трещине и на заварку краёв трещины расплавленным материалом.

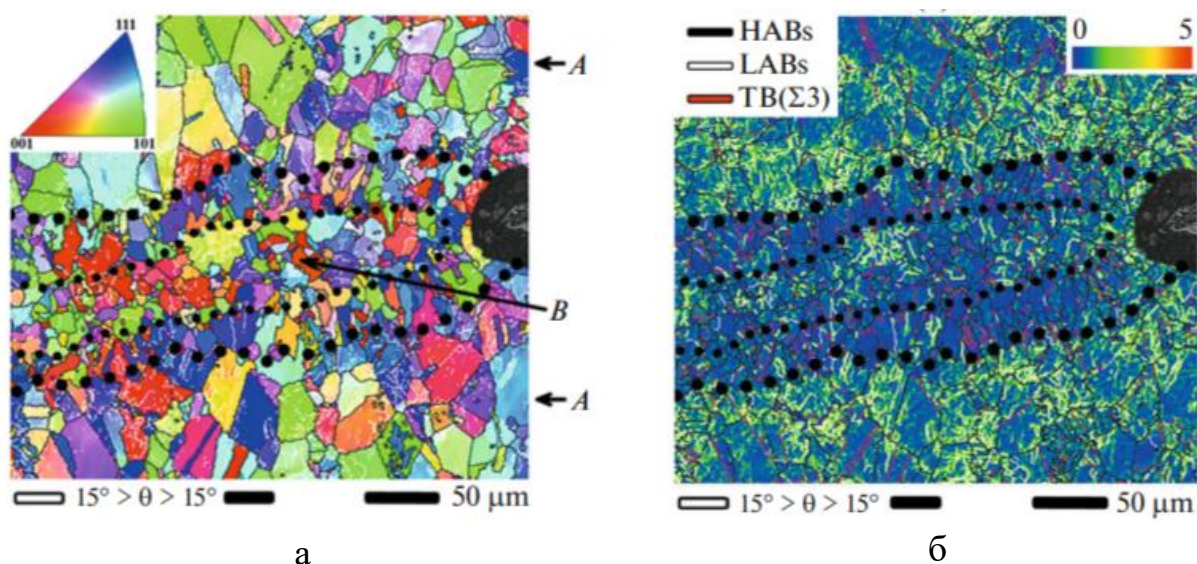


Рисунок 2 – EBSD – карты: а – обратная полюсная фигура, б – карта локальных разориентаций

Таким образом, в данной работе проведено залечивание усталостных трещин в пластинах из стали 12Х15Г9НД с помощью поэтапного воздействия последовательными импульсами тока. Анализ микроструктуры показал, что залечивание трещин происходило по механизму заварки краев трещин расплавленным металлом, подвергшимся воздействию высоких температур и сжимающих механических напряжений.

### Список литературы

1. Обзор исследований по залечиванию макротрещин в металлах под действием импульсного тока высокой плотности / В. А. Брызгалов, А. Ю. Моркина, Д. У. Абдуллина [и др.] // Materials. Technologies. Design. – 2024. – Т. 6, № 2(17). – С. 38-58. – DOI 10.54708/26587572\_2024\_621738. – EDN AACKBG.
2. An Analysis on the Inhomogeneous Microstructure in Crack Healing Area / D. B. Wei, J. T. Han, A. K. Tieu, Z. Y. Jiang // KEM. – 2004. – V. 274–276. – P. 1053–1058. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.274-276.1053>
3. Xin, R. Effect of parameters on internal crack healing in 30Cr2Ni4MoV steel for 600-ton ultra-super ingots / R. Xin, J. Luo, Q. Ma // Metals. – 2017. – V.7. – P. 149. <https://doi.org/10.3390/met7040149>
4. Effect of Repetitive High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires under Stepwise Loading / S. V. Dmitriev, A. Y. Morkina, D. V. Tarov [et al.] // Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research. – 2024. – Vol. 1, No. 1. – P. 27-43. – DOI 10.31181/smeor1120243. – EDN LCUN-MU.
5. Hosoi, A. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field / A. Hosoi, T. Nagahama, Y. Ju // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – V. 533. – P. 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.024>
6. Методика оценки длины усталостных трещин при их залечивании импульсным током / О. В. Муругова, М. И. Нагимов, Г. Р. Халикова, С. В. Дмитриев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 294-303. – DOI 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.003. – EDN QAVGPF.