

УДК: 621.7.044

**ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО
СПЛАВА ЖС6У, ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКИ
ЧИСТОГО ТИТАНА**

А.И. Амиров, А.А. Елисеев

Научный руководитель: д.т.н. Е.А. Колубаев

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634021

E-mail: amirov@ispms.tsc.ru

**WEAR OF ZHS6U NICKEL SUPERALLOY TOOL IN FRICTION STIR PROCESING ON
COMMERCIALY PURE TITANIUM**

A.I. Amirov, A.A. Eliseev

Dr. E.A. Kolubaev

Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634021

E-mail: amirov@ispms.tsc.ru

***Abstract.** Investigation of the wear of zhs6u nickel superalloy tool in the method of friction stir welding has been carried out. The results of the research show that the tool had been stirred more than 2.5 meters of material, before it wears. However, the highest wear of the tool is observed at the area of crossover of pin to shoulders, which becomes the reason of macrodefects formation in the processed material.*

Введение. Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это хорошо зарекомендованная, высокоэффективная сварочная технология, которая даёт возможность производить высококачественные швы с превосходными эксплуатационными свойствами, благодаря чему имеет высокий промышленный потенциал. Такая сварка чаще используется в авиакосмической отрасли для сварки алюминиевых сплавов [1]. На данный момент имеются множество исследований по применению данного метода к титановым сплавам, хотя имеются ряд проблем, наибольшей из которых является быстрый износ инструмента [2].

Учитывая суровые рабочие условия, сварочный инструмент для сварки трением с перемешиванием обычно изготавливаются из тугоплавких материалов, включая сплавы на основе вольфрама, на основе кобальта, на основе молибдена и на основе поликристаллического нитрида бора. Недавние исследования [3] показали возможность применения жаропрочного сплава ЖС6У на основе никеля в качестве материала инструмента, однако в ней не рассматривался износ инструмента. На практике ЖС6У успешно используется для изготовления лопаток турбин, работающих при повышенных температурных и механических нагрузках с 60-х годов прошлого века. Здесь будут показаны результаты исследования износа инструмента и влияние его на шов СТП титанового сплава. Так как сварка трением с перемешиванием и обработка трением с перемешиванием являются родственными процессами [4], а в технологии процессов имеются отличия лишь в подготовке свариваемых листов, в данном исследовании использовалась обработка трением с перемешиванием (ОТП).

Экспериментальная часть. В качестве обрабатываемого материала для исследования износа инструмента являлся технически чистый титан ВТ1-0 толщиной 2,5 мм. При обработке использовался постоянный режим, описанный в работе [3] как наиболее оптимальный. Поэтому усилие инструмента при внедрении и в процессе сварки составляло 800 кг, скорость сварки была равна 180 мм/мин, скорость вращения инструмента в процессе сварки составляла 950 об/мин.. Для исследования макроструктуры сварных швов изготавливались поперечные полированные и травленные металлографические шлифы. Шлифы изделий из сплава ВТ1-0 травили в растворе плавиковой кислоты 2% в течение 2 минут с последующим промыванием в 40% азотной кислоте. Структура инструмента выявлялась при помощи реагента 8g CuSO₄, 40 ml HCl, 40 ml H₂O. Металлографические исследования выполнялись на лазерном конфокальном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS 4100. Элементный анализ изучали при помощи растрового электронного микроскопа LEO EVO 50.

Результаты. Визуально поверхность трения инструмента равномерно покрыта слоем окисленного титана, оставшегося после обработки. В процессе ОТП первыми изнашиваются кромки штифта и плеч. Штифт инструмента постепенно переходит из формы конуса в форму, близкую к цилиндру. Также на инструменте образуется выемка в области основания штифта. Визуально изнашивание инструмента по ходу обработки происходит равномерно. После 1105 мм обработки штифт ещё сохраняет свою конусность, при этом выемки в районе перехода штифта и плеч отсутствуют.

Результат сравнительного анализа геометрии инструмента в разрезе по осевому сечению до начала ОТП и после 2755 мм обработки показал, что наибольшему износу подверглись плечи в области основания штифта, где глубина выемки достигала 1 мм. Износ плеч на краях был незначительным – в среднем 0,25 мм. Высота штифта сохранилась. Данный характер изнашивания имеет ряд опасностей. Так, например, уменьшение диаметра основания штифта может приводить к недостаточному тепловыделению в виду уменьшения скорости трения и недостаточному перемешиванию. Кроме того, при изнашивании плеч высота штифта не изменяется, из-за чего увеличивается погружение в материал, в результате чего штифт может достигать подложки. Это может привести к привариванию к подложке и занесение в зону перемешивания материала из подложки.

Полученные металлографические изображения инструмента и исходного материала ЖС6У показали, что их структура представлена колониями дендритов γ фазы. В основном по границам колоний в виде контрастных светлых объектов находятся карбиды, характерные для сплава. Колонии дендритов, как в основном материале, так и в инструменте после обработки стремятся к равноосной форме. Хотя после теплового воздействия при ОТП элементы структуры выросли. Расстояния между осями дендритов 1 порядка, а также осями 2 порядка увеличились примерно в 3 раза. Что характерно, структура изменилась равномерно по всему объему инструмента. Однако, близко к поверхности трения не наблюдается изменения размеров колоний, расстояния между осями или увеличения количества карбидов. Величина слоя титана налипшего в процессе ОТП составляет 30-80 мкм.

Под качеством обработки подразумевается структура обработанного материала и его механические свойства. Были получены металлографические изображения материала ОТП в поперечном сечении на различных участках обработки: через 5 мм, 560 мм и 2755 мм, которые показали, что на всех участках обработки общий вид шва и характерный вид структурных зон у всех образцов одинаков. В структуре соединения выделяются 2 зоны: зона перемешивания (ЗП), которая состоит из фрагментированных рекристаллизованных зерен титанового сплава, и зона термомеханического влияния

(ЗТМВ), за которой находится основной металл. Зона термического влияния, обычно находящаяся между основным материалом и ЗТМВ, в титановых сплавах часто отсутствует или не выявляется. ЗТМВ при СТП/ОТП титановых сплавов относительно узкая по сравнению с соединениями других материалов. Толщина ЗТМВ в среднем около 0,25 мм. Расположение структурных зон симметрично относительно оси соединения. Форма структурных зон на разных участках обработанного материала отличается незначительно. Площадь поперечного сечения зоны перемешивания с износом инструмента постоянно уменьшаются. В первом образце она составляла 11,11 мм², а в последнем – 8,03 мм². Это связано с тем, что в процессе изнашивания инструмента происходит уменьшение диаметра штифта инструмента.

Результаты механических испытаний на статистическое растяжение зоны перемешивания образцов показали, что предел прочности обработанного материала возрастает на ≈25 % относительно исходного сплава ВТ1-0, у которого предельная прочность была 350 МПа. В процессе износа инструмента предельная прочность образцов падала и после 2700 мм от начала использования инструмента составила 375 МПа, что выше прочности исходного материала на ≈7 %. Значительное уменьшение прочности наблюдается после 500 мм обработки – при появлении первых макродефектов. Затем резкое снижение прочности после 2300 мм обработки также соответствует значительному увеличению объёма несплошностей. Уменьшение прочности связано, прежде всего, с ростом количества дефектов по мере износа инструмента, так как формоизменение штифта является причиной недостаточного прогрева и неоптимальному перемешиванию материала. Несмотря на превышение прочности исходного материала, полученный результат не является удовлетворительным, из-за наличия макродефектов, которые делают соединение нестабильным в условиях усталостного нагружения.

Заключение. Исследована долговечность инструмента из сплава ЖС6У при ОТП технически чистого титана и влияние его износа на качество шва. Инструмент обработал 2755 мм титана без разрушения. Обнаружено, что наиболее сильному износу подвергается область основания штифта, который терял конусность, а в плечах возникла выемка глубиной 1 мм. Обнаружено, что в результате перегрева инструмента при обработке произошла рекристаллизация сплава ЖС6У. Износ инструмента привел к изменению макроструктуры обработанного материала. По мере изнашивания уменьшалась ЗП и увеличивались макродефекты. В целом, сплав ЖС6У оказался пригодным для СТП/ОТП титана.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90187

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mishra, R.S., Ma, Z.Y. Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering R: Reports. – 2005. – Vol. 50, iss.1-2. – P.1–78.
2. Wu, L.H., Wang, D., Xiao, B.L., & Ma, Z.Y. Tool wear and its effect on microstructure and properties of friction stir processed Ti–6Al–4V // Materials Chemistry and Physics. – 2014. – Vol. 146, iss. . – P.512–522.
3. Amirov, A.I., Eliseev, A. A., Rubtsov, V.E., & Utyaganova, V.R. Butt friction stir welding of commercially pure titanium by the tool from a heat-resistant nickel alloy // Proceedings of the international conference on advanced materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures. – 2019. – Vol. 2167. – P.020016.
4. Mironov, S., Sato, Y. S., & Kokawa, H. Friction-stir welding and processing of Ti-6Al-4V titanium alloy: A review // Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Vol.34, iss.1. – P.58–72.