

УДК 621.922.079.678

О.А. Розенберг, д-р техн. наук, проф., **С.В. Сохань**¹, д-р техн. наук,
Н.Н. Кузьменко², канд. техн. наук, **Д.В. Ефросинин**¹

¹Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, г. Киев

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti–Si ПОСЛЕ АЛМАЗНОЙ ДОВОДКИ

Research technique and results are represented for a study of surface roughness and structure at diamond lapping of titanic alloy with system Ti–Si. Because of structure heterogeneity it is impossible to receive stable surface quality after diamond processing on textolite lap. Preliminary surface plastic deforming is added to decrease surface roughness of titanic alloy.

Сегодня титановые сплавы занимают достойное место среди конструкционных материалов. Они применяются в автомобиле-, авиастроении, а также в медицине при необходимости создания конструкций с высокой удельной прочностью, защищенные от коррозии.

Для Украины, как и многих других стран актуальны проблемы, связанные с изготовлением и использованием в медицине имплантатов различного назначения. Известно, что эндопротез тазобедренного сустава должен работать при больших нагрузках продолжительное время, поэтому главными факторами при выборе материала для изготовления подобного протеза являются прочность и износостойкость [1].

В настоящее время для изготовления имплантатов используются высокопрочная нержавеющая сталь, алюмооксидная и циркониевая керамика, кобальт-хром-молибденовые сплавы, а также наиболее распространенный промышленный титановый сплав системы Ti–6Al–4V (VT6). Использование титановых сплавов в медицине связано с тем, что при сравнительно высоком уровне аллергических реакций организма на различные металлы и их сплавы применяемые в медицине титан рассматривается как решающая альтернатива, поскольку его биосовместимость и стабильность обратили на себя должное внимание ортопедов [1]. До недавнего времени в медицине широко использовали эндопротезы тазобедренного сустава с шарнирным узлом «сплав титана VT6 – полиэтилен». Существенными недостатками титанового сплава VT6 являются значительный износ пары трения «титановый сплав – полиэтилен», а значит, малый ресурс эндопротеза, а также канцерогенность алюминия и токсичность ванадия. Это привело к отказу от использования сплава VT6 для изготовления головок тазобедренного сустава.

В Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича разработаны титановые сплавы системы Ti–Si, в состав которых алюминий и ванадий не входят. Сплавы этой системы имеют высокие антифрикционные и износостойкие свойства, что позволяет рекомендовать их для использования в современных конструкциях эндопротезов, где парой трения является пара «металл – металл». Коррозионная стойкость и биологическая совместимость такого сплава в человеческом организме намного выше, чем у традиционного промышленного титанового сплава ВТ6 [2]. В настоящее время в ИПМ НАН Украины сплавы системы Ti–Si совершенствуются применительно к изготовлению изделий медицинского назначения широкой номенклатуры [3–5].

Новые сплавы получены путем вакуумно-дугового переплавления предварительно выплавленного расходного электрода определенного состава. В качестве исходной шихты для переплавления использовали сплав ВТ1-0 твердостью НВ 131–163 и кремний марки КР1. Исходный сплав ВТ1-0 имеет типичную для α -титановых сплавов рекристаллизованную структуру (рис. 1, а) и состоит из крупных зерен (0,2–0,6 мм). Легированный кремнием сплав Ti–Si был деформирован ковкой со степенью деформации около 70 % при температуре 1000–1100 °С. Этот сплав имеет пластинчатую структуру, которая состоит из фрагментов либо колоний, которые, в свою очередь, состоят из повторяющихся, или разориентированных пластин α -фазы (рис. 1, б). Металлография такого сплава, деформированного ковкой, показывает довольно равномерное распределение раздробленных первичных силицидов фазы Ti_5Si_3 по всему объему материала.

Твердость титанового сплава, дополнительно легированного кремнием, увеличивается по сравнению с прокатом из чистого титана марки ВТ1-0 в зависимости от степени легирования и режимов термомеханической обработки. Твердость конечного сплава системы Ti–Si может изменяться в пределах НВ 210–450. В настоящей работе использовали сплав системы Ti–Si твердостью НВ 215–240 и сплав ВТ6 твердостью НВ 293–361. Результаты исследования структуры и механических свойств титановых сплавов системы Ti–Si в литом и деформированном состояниях приведены в [3–5]. Прочность сплава Ti–Si, исследованного в настоящей работе, составляла 650–700 МПа, удлинение – 8–10 %.

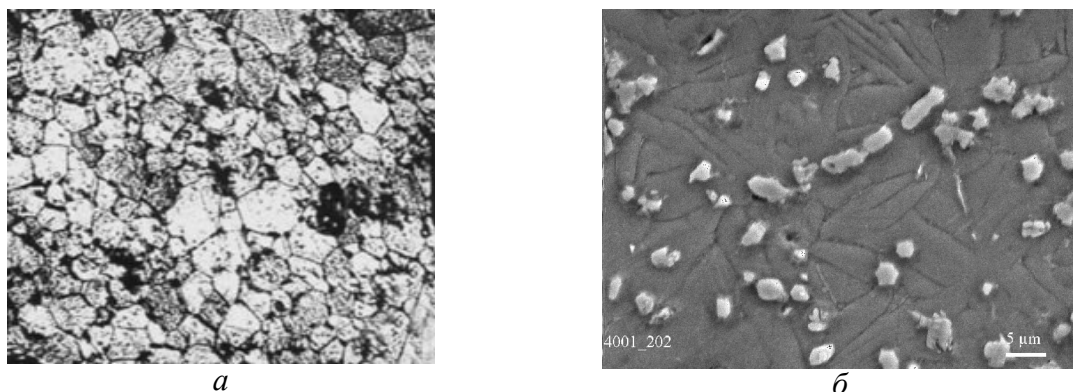


Рис. 1. Структура титанового сплава: а – ВТ1-0 (исходного); б – с добавкой кремния

Проблемой использования нового сплава является влияние его структурной неоднородности (поскольку основа сплава – титан – пластичный материал, а кремний образует силициды – твердые включения) на обрабатываемость доводкой и полированием. Структурная неоднородность затрудняет получение шероховатости поверхности, необходимой для поверхностей компонентов шарнира эндопротеза согласно стандарту ISO 7602–2 ($R_a = 0,01–0,02$ мкм).

Изложим методику и результаты исследования шероховатости поверхности при поверхностном пластическом деформировании и последующей доводки титанового сплава системы Ti–Si.

Суть методики состоит в следующем. Исследования проводили на токарном станке модели 1К62 с использованием упругой державки (рис. 2) на следующих режимах. Притиру 1 в виде плоской планшайбы из текстолита диаметром 160 мм, закрепленному в токарном патроне, задавали вращение с частотой $n = 250$ об./мин. К его торцу с помощью упругой державки 3 прижимали плоский титановый образец 2 диаметром 32 мм с давлением прижима $P = 130$ кПа. За счет прижима через шаровой шарнир образец имел возможность самоустанавливаться на торцевой поверхности притира. Для равномерного износа притира образец перемещали возвратно-поступательно вдоль поверхности притира с поперечной подачей $S = 0,21$ мм/об. (рис. 3).

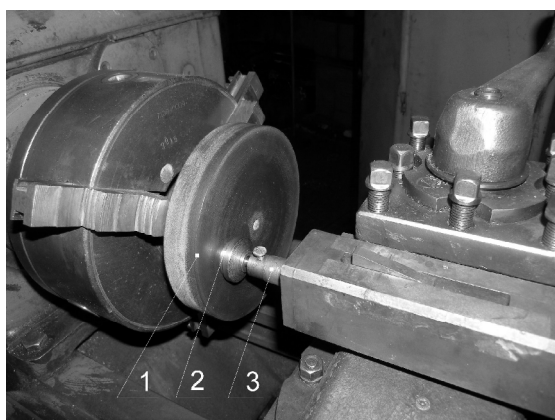


Рис. 2. Алмазная доводка образцов титанового сплава на притире из текстолита: 1 – притир; 2 – образец; 3 – упругая державка

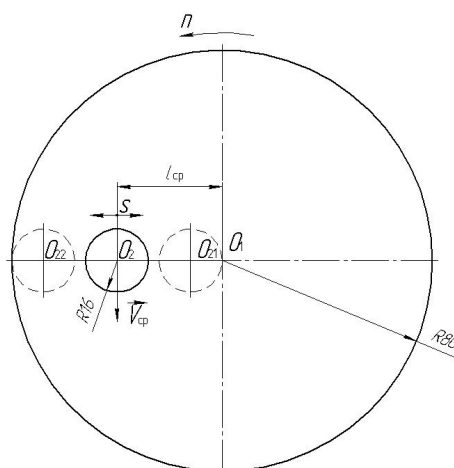


Рис. 3. Схема возвратно-поступательной подачи образца по притиру

В качестве линейной скорости образца была взята скорость v_{cp} его центра O_2 в среднем положении на расстоянии l_{cp} от центра притира. Скорость подачи не учитывали. Таким образом, вращение притира обеспечивало линейную скорость образца 0,63 м/с. Под действием сил трения в контакте титановый образец вращался вокруг своей оси, увлекаемый силами сцепления с ведущим звеном – притиром. В зону контакта периодически подавали алмазную пасту, которая обеспечивала абразивное изнашивание материала образца и притира. Использовали алмазные пасты марки

АСМ, зернистостью 60/40; 3/2; 1/0. Шероховатость поверхности измеряли на профилографе-профи-лометре модели 201.

На первом этапе был проведен эксперимент по оценке воспроизводимости результатов шероховатости поверхности после алмазной доводки сплавов ВТ6 и системы Ti–Si. Эксперимент повторяли четыре раза, не изменяя режимы обработки ($p = 130$ кПа; $v = 0,63$ м/с) и используя алмазную пасту марки АСМ зернистостью 60/40. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Шероховатость поверхности сплава ВТ6 и сплава системы Ti–Si после доводки алмазной пастой марки АСМ зернистостью 60/40

Параметр шероховатости R_a							
Сплав системы <i>Ti-6Al-4V</i>				Сплав системы <i>Ti-Si</i>			
измеренный, мкм	среднее значение, мкм	Отклонение Δ		измеренный, мкм	среднее значение, мкм	Отклонение Δ	
		абсолютное значение, мкм	%			абсолютное значение, мкм	%
0,13	0,128	+0,002	1,5	0,18	0,147	+0,033	22,4
0,13		+0,002	1,5	0,2		+0,053	36,1
0,12		-0,008	6,2	0,14		-0,007	4,7
0,13		+0,002	1,5	0,07		-0,140	95,2

Приведенные в табл. 1 результаты измерений, показывают, что для титанового сплава системы Ti–Si максимальное отклонение текущих значений от среднего ($R_{a,cp} = 0,147$ мкм) составляет 95,2 %, а для ВТ6 ($R_{a,cp} = 0,128$ мкм) – 6,2 %. Таким образом, неоднородность структуры титанового сплава системы Ti–Si не позволяет получать стабильную шероховатость поверхности после алмазной доводки на неизменных режимах.

Эксперимент повторили со сплавом Ti–Si, при использовании алмазных паст марки АСМ зернистостью 3/2 и 1/0 (табл. 2).

Таблица 2. Шероховатость поверхности сплава системы Ti–Si после доводки алмазными пастами марки АСМ зернистостями 3/2 и 1/0

Параметр шероховатости R_a							
АСМ 3/2				АСМ 1/0			
измеренный, мкм	среднее значение, мкм	Отклонение Δ		Измеренный, мкм	среднее значение, мкм	Отклонение Δ	
		абсолютное значение, мкм	%			абсолютное значение, мкм	%
0,07	0,128	-0,058	45,3	0,023	0,033	-0,010	30,3
0,12		-0,008	6,2	0,033		0	0
0,15		+0,022	17,2	0,035		+0,002	6,1
0,17		+0,042	32,8	0,040		+0,007	21,2

Максимальное отклонение текущего значения шероховатости поверхности от среднего ($R_{a,cp} = 0,128$ мкм после доводки алмазной пастой марки АСМ зернистостью 3/2, и $R_{a,cp} = 0,033$ мкм после доводки алмазной пастой марки АСМ зернистостью 1/0) составило соответственно 45,3 и 30,3 %. Таким образом, при снижении зернистости паст снижается и отклоне-

ние текущих значений от средних. Результаты доводки алмазными пастами марки АСМ зернистостями 60/40 и 3/2 оказались довольно близкими по достигнутой шероховатости поверхности, что свидетельствует о неудовлетворительной обрабатываемости титанового сплава системы Ti–Si абразивной доводкой.

Чтобы повысить воспроизводимость результатов процесса доводки по шероховатости поверхности титанового сплава системы Ti–Si, было предложено ввести пред-варительное поверхностное пластическое деформирование его поверхности накатыванием шариком. Для этого образец 1 (рис. 4) зажимали в токарном патроне и придавали вращение со средней скоростью $v_{cp} = 0,42$ м/с ($n_1 = 200$ об./мин). Упругую державку 2 с шариком диаметром 16 мм прижимали с усилиями $P = 0,4; 0,5$ кН. Державке придавали поперечную подачу из точки O_1 в точку O_2 со скоростью $S = 0,035$ мм/об., количество проходов составило $N = 5$.

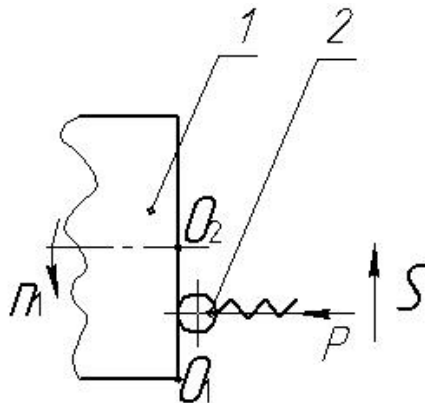


Рис. 4. Схема накатывания шариком плоского образца 1 титанового сплава системы Ti–Si

Накатывание шариком привело к измельчению структуры, что, в свою очередь, улучшило обрабатываемость сплава при доводке пастами мелкой зернистости. На рис. 5 приведена гистограмма изменения шероховатости поверхности титанового сплава Ti–Si после различных видов обработки.

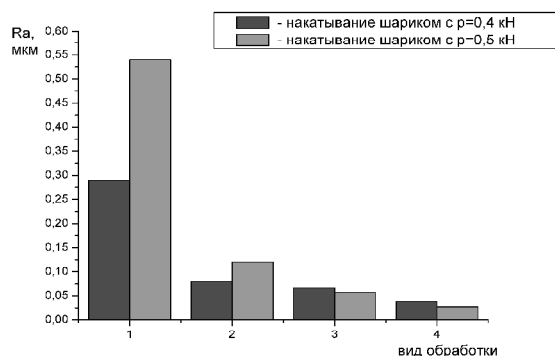


Рис. 5. Изменение параметра шероховатости поверхности R_a титанового сплава Ti–Si после: 1 – обработки шлифование; 2 – пластического деформирования; 3 – доводки алмазной пастой марки АСМ зернистостью 3/2; 4 – доводки алмазной пастой марки АСМ зернистостью 1/0

Первый этап обработки, шлифование поверхности – подготовительный. Он сопровождается изменением шероховатости поверхности в широком диапазоне ($R_a = 0,29–0,54$ мкм), т. е. максимальное значение R_a более чем в 2 раза превышает минимальное. На втором этапе обработки – накатывание шариком – качество обработанной поверхности значительно улучшилось, диапазон изменения шероховатости поверхности $R_a = 0,08–0,12$ мкм. Третий и четвертый этапы обработки различаются только зернистостью алмазной пасты при доводке поверхности. На четвертом этапе шероховатость поверхности низкая: $R_a = 0,027–0,038$ мкм. Это указывает на то, что поверхностное пластическое деформирование позволяет улучшить качество поверхности титанового сплава системы Ti–Si, после доводки алмазными пастами мелкой зернистости.

Накатывание шариком приводит к разрушению целостного силицидного каркаса по границам зерен и способствует структурной гомогенизации материала (рис. 6) [2]. С увеличением нагрузки происходит дальнейшее измельчение структурных параметров, в том числе и упрочняющей силицидной фазы Ti_5Si_3 . Углубления на рис. 6, а, указывают на то, что при пластическом деформировании поверхности отдельные силицидные включения вырываются с поверхности сплава, а при более жестких режимах накатывания сглаживаются (рис. 6, б). Поэтому при последующей доводке улучшилась также шероховатость поверхности.

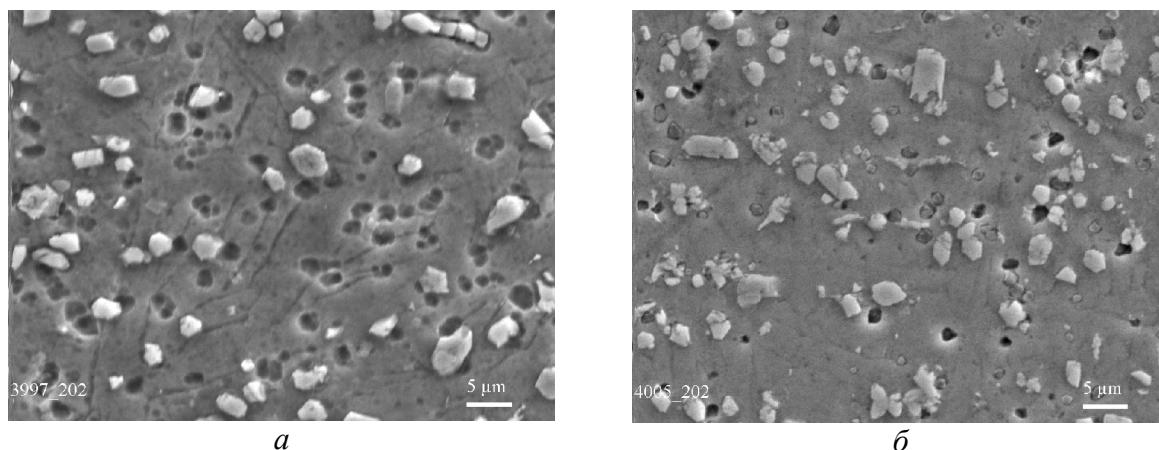


Рис. 6. Структура образцов при накатывании шариком: а – $P = 0,4$ кН; б – $P = 0,5$ кН

Таким образом, из-за неоднородности структуры невозможно получить стабильно низкую шероховатость поверхности при алмазной доводке. Введение предварительного поверхностного деформирования титанового сплава Ti–Si способствует стабильному получению низких показателей шероховатости поверхности вследствие дробления, а в отдельных случаях вырыва твердых силицидных зерен. Кроме того, благодаря накатыванию шариком углубления, остающиеся после вырывания силицидных зерен, заглаживаются, что также улучшает показатели последующего процесса доводки.

Литература

1. Титановые сплавы в эндопротезировании тазобедренного сустава [Cited 2008, 21 may]. Available from: <<http://www.implants.ru/tehn-inf/1-st.shtml>>.
2. Кузьменко М.М. Розробка термдеформованих титанових композитів системи Ti–Si–(Al,Zr) конструкційного призначення для використання в інтервалі температур 20-700 °С: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01/ Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. – К., 2006. – 18 с.
3. Кузьменко М.М. Дослідження структури та механічних властивостей литих сплавів системи Ti–Si// Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. Т. 44. – № 1. – С. 45-48.
4. Кузьменко М.М. Вплив пластичного деформування на структуру та механічні властивості сплавів системи Ti–Si// Современные проблемы физического материаловедения. – К. 2007. – Вып. 16. – С. 118-121.
5. Баглюк Г.А., Кузьменко Н.Н. Горячая деформация жаропрочного титанового сплава с интерметаллидным упрочнением// Физика и техника высоких давлений. – 2004. – Т. 14. – С. 90-97.

Поступила 04.06.08