



УДК 621.919

*Розенберг О.А.¹, Шейкин С.Е.¹, Моляр А.Г.², Ростоцкий И.Ю.¹, Ефросинин Д.В.¹*¹ Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Украина, г. Киев² Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. Украина, г. Киев

О ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И УПРОЧНЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ НАКАТЫВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ VT1-0 И VT22 СТАЛЬНЫМИ ШАРАМИ

Анотація

У статті викладено результати дослідів по накатуванню стальними кулями титанових сплавів, а також надані технологічні рекомендації по їх обробці накатуванням.

Abstract

In the article is described result of researches of titan alloys by rolling steel spheres, and also are marked technological recommendations for their machining by rolling.

Применение титановых сплавов в качестве материала ответственных деталей машин обусловлено, в основном, их химической стойкостью, высокой удельной прочностью и специфическими теплофизическими свойствами.

Используя в качестве финишной операции обработки деталей машин методы холодного поверхностного пластического деформирования (ХППД), можно существенно снизить шероховатость поверхности, упрочнить поверхностный слой и, тем самым, существенно поднять их эксплуатационные характеристики.

Однако, при том, что титановые сплавы хорошо обрабатываются всеми способами горячей пластической деформации, не все методы ХППД могут быть применены для их обработки. Применение методов ХППД, в основе которых лежит трение скольжения (выглаживание, деформирующее протягивание), в настоящее время невозможно [1–4], вследствие повышенной склонности титановых сплавов к схватыванию с инструментальными материалами и отсутствием технологических смазок, способных схватывание предотвратить.

Большинство исследователей сходятся во мнении, что, несмотря на ряд положительных результатов [5, 6], вопрос разработки технологических смазок для обработки титана указанными методами, требует еще своего разрешения, так как ни одна из разработанных смазок не может полностью гарантировать отсутствие схватывания.

Из методов ХППД для обработки титановых сплавов могут быть применены те, в основе кото-

рых лежит трение качения [8], в частности, накатывание роликами и шарами.

Особенностью накатки роликами является наличие принудительной оси вращения, что приводит к увеличению доли трения-скольжения при взаимодействии инструмента с обрабатываемой деталью по сравнению с обкаткой шарами. Учитывая повышенную склонность титановых сплавов к схватыванию, данный факт является важным. Кроме того, накатывание шарами позволяет работать с меньшими усилиями, уменьшает вероятность деформирования маложестких деталей и шелушения обрабатываемой поверхности [3, 8].

Целью настоящего исследования является изучение влияния технологических режимов накатывания шарами на шероховатость обработанной поверхности и упрочнение поверхностного слоя деталей из титановых сплавов VT1-0 и B22. Выбор данных марок сплавов обусловлен следующим. Технически чистый титан обладает высокой биологической совместимостью с живой тканью человеческого тела, вследствие чего может быть использован в качестве материала для различного вида имплантатов, применяемых в костной хирургии [9]. Сплав VT 22 широко применяется для изготовления деталей в авиационной и космической технике. В значительном числе случаев, к указанным деталям предъявляются высокие требования по шероховатости обработанной поверхности и микротвердости поверхностного слоя.

Поскольку титановые сплавы довольно существенно упрочняются деформацией, то для получения достоверных результатов по изучению накатки необходимо перед исследованиями привести структуру и напряженное состояние образцов в максимально устойчивое состояние, обеспечив максимальную пластичность сплава. Максимальная пластичность титановых сплавов, в частности однофазных, к которым относится VT1-0 (технически чистый титан с технологическими добавками алюминия до 0,7%) достигается отжигом при температуре близкой к температуре начала рекристаллизации. В нашем случае, при использовании исходной прутковой заготовки, температура отжига составляла 650°C. Для обеспечения мини-

мальных внутренних напряжений от механической обработки, заготовки предварительно механически обрабатывались с оставлением минимального припуска на чистовую обработку и отжигались в вакуумной печи СНВЛ1.3.1/16М1 при остаточном давлении $P_{ост.} \leq 2 \times 10^{-2}$ Па в течение 120 мин.

Для двухфазного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава максимальная пластичность (сочетание пластических и прочностных свойств) может быть получено при определенных размерах и морфологии выделений вторичной α -фазы, что достигается «мягкой» закалкой и последующим старением, по другому называемой «ступенчатой термообработкой». Эта обработка включает в себя нагрев до температуры на 30–50°C ниже полиморфного превращения (в нашем случае 820°C) с выдержкой не более 60 мин. для снятия внутренних напряжений и частичной стабилизации фазового состава, охлаждение до 750°C и выдержки 120 мин., с ускоренным охлаждением (скорость охлаждения $\geq 5^\circ\text{C}/\text{мин}$) до температуры 500°C. При такой обработке в сплаве фиксируется определенное количество избыточной β -фазы, которая старением при температуре 600°C может быть разложена с выделением мелкозернистой α -фазы. Указанную термообработку сплава ВТ22 также выполняли в вакууме после предварительной механической обработки во избежание влияния вакуумного растравливания поверхности при высоких температурах [10].

После термообработки заготовки имели твердость: ВТ1-0 — НВ = 1600 МПа, ВТ22 — НВ = 3300 МПа [10]. Для экспериментов использовали цилиндрические детали $\varnothing 36$ мм, которые после термообработки окончательно обтачивали при подаче $S = 0,17$ мм/об до шероховатости $Ra = 5-6$ мкм. Вследствие того, что скорость накатывания на шероховатость обрабатываемой поверхности практически не влияет [11], ее значение не менялось и составило $V = 36$ м/мин. В экспериментах использовали обкатник упругого действия, обеспечивающий плавную работу и равномерное усилие по всей обрабатываемой поверхности. Пружину

обкатника предварительно тарировали. Использовали шары из ШХ 15 диаметром $\varnothing 5, 8$ и 13,5 мм. В качестве технологической смазки использовали в соответствии с рекомендациями [8] промышленное масло 20.

Для измерения шероховатости использовали профилометр-профилограф Talysurf — 5М-120. Измерение микротвердости производилось на приборе ПМТЗ.

Для уменьшения разброса значений и большей наглядности представления результатов в виде графиков вместо Ra (мкм) использовали относительную шероховатость Ra/Ra_0 , где Ra — шероховатость поверхности после обкатывания; Ra_0 — исходная шероховатость. Для удобства анализа закономерностей изменения шероховатости в области малых значений (менее 0,1 мкм), графики строили в полулогарифмических координатах.

Результаты исследований в виде зависимостей относительной шероховатости Ra/Ra_0 от количества проходов, полученных, при различных технологических режимах при обкатывании деталей из ВТ1-0 в полулогарифмических координатах, приведены на рис. 1.

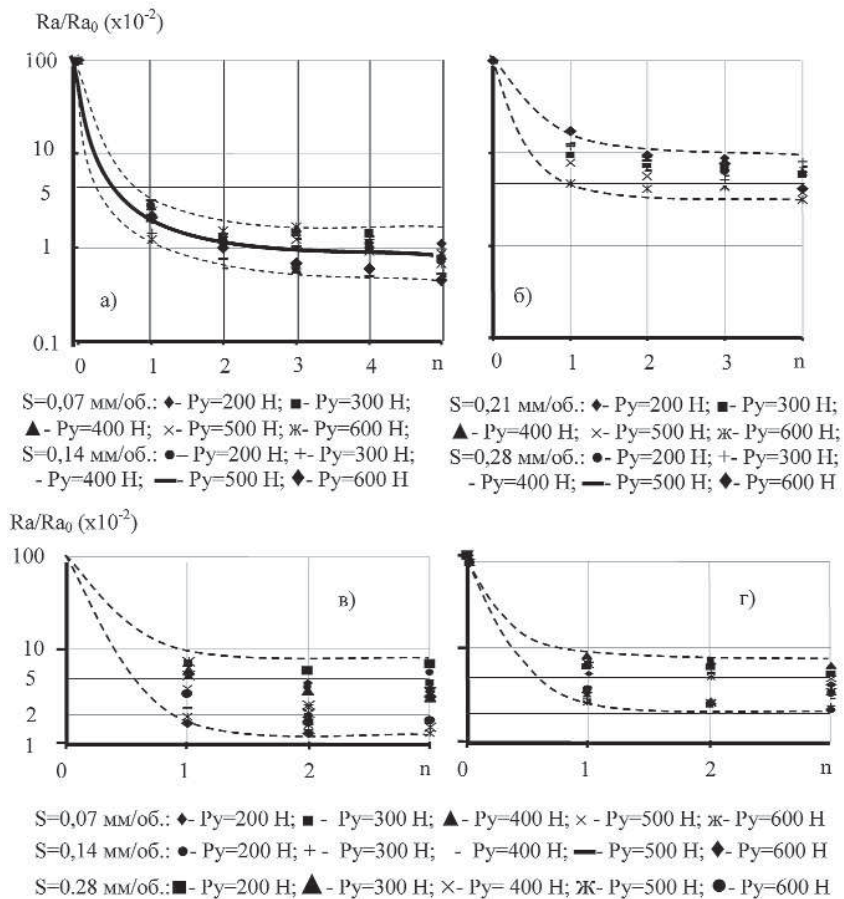


Рис. 1. Зависимость относительной шероховатости от количества циклов ($n=1-5$) при обкатывании детали из ВТ1-0 при различных технологических режимах:

а) $d\varnothing=5$ мм, $S=0,07, 0,14$ мм/об.; б) $d\varnothing=5$ мм, $S=0,21, 0,28$ мм/об.;
 в) $d\varnothing=8$ мм; г) $d\varnothing=13,5$ мм

Пунктирными линиями на рисунке ограничен диапазон значений относительной шероховатости поверхности.

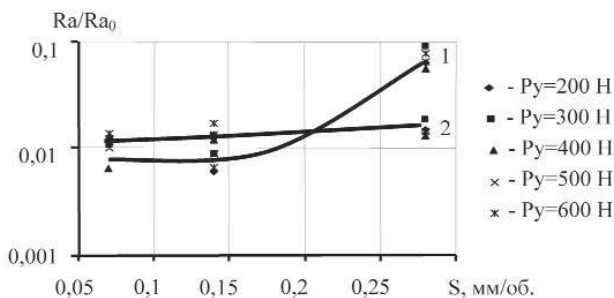


Рис. 2. Зависимость относительной шероховатости от подачи после второго цикла обработки при обкатывании сплава VT1-0 шаром \varnothing 5 мм (1) и \varnothing 13,5 мм (2)

Анализируя результаты исследований, можно отметить следующее. Наиболее интенсивное снижение шероховатости происходит при прочих равных условиях при обкатывании наименьшим (\varnothing 5 мм) из примененных шаров. При этом значения шероховатости практически достигают минимальных значений

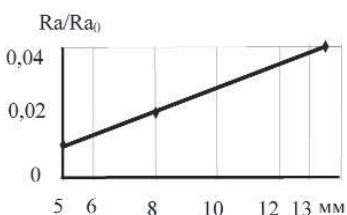


Рис. 3. Зависимость относительной шероховатости от диаметра шара после двух циклов обработки VT1-0 при подаче $S = 0,07-0,14$ мм/об., $P_y = 600$ Н

уже после второго прохода и далее с увеличением их числа уменьшаются незначительно. Характерно, что сила прижима инструмента к заготовке в диапазоне 200–600 Н на значение Ra/Ra_0 практически не влияет (рис. 1, а). Полученную экспериментальную зависимость относительной шероховатости от количества проходов для шара \varnothing 5 мм и подач $S = 0,07, 0,14$ мм/об можно аппроксимировать зависимостью $Ra/Ra_0 = 0,0179e^{-0,1858n}$.

С увеличением подачи ($S > 0,14$ мм/об) значение Ra/Ra_0 увеличивается. При этом минимальные значения получаются также после второго прохода (рис. 1, б).

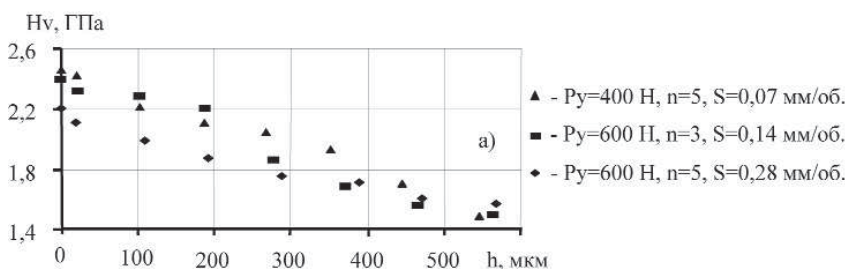


Рис. 4. Распределение микротвердости в поверхностном слое деталей из VT1-0 после обкатывания ($d_{ш} = 5$ мм) по различным технологическим режимам

При больших значениях диаметра шара влияние подачи на шероховатость выражено не столь явно. Данную закономерность иллюстрирует рис. 2. Видно, что влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности наиболее отчетливо просматривается при использовании шара наименьшего диаметра (\varnothing 5 мм).

На рис. 3 приведена зависимость в линейных координатах относительной шероховатости от диаметра шара после второго цикла обработки. Значения получены с учетом статистической обработки экспериментальных данных. Очевидно, что наименьшие значения относительной шероховатости получаются при использовании шара наименьшего диаметра.

Экспериментальными исследованиями [3] установлено, что при обработке титановых сплавов с увеличением диаметра шара поверхностная микротвердость снижается. По этой причине в наших экспериментах использовали шары \varnothing 5 мм.

На рис. 4 приведено распределение микротвердости в поверхностном слое детали из VT1-0 после обкатывания по различным технологическим режимам. Видно, что при накатывании сплава VT1-0 возможно получить увеличение поверхностной микротвердости (HV/HV_0) в 1,6 раза и глубину слоя деформационного упрочнения до 400 мкм.

На рис. 5 приведены зависимости относительной шероховатости поверхности Ra/Ra_0 от количества проходов при обкатывании деталей из VT22 при различных технологических режимах. Пунктирными линиями ограничен диапазон значений относительной шероховатости поверхности, полученных в экспериментах.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что установленные зависимости подчиняются тем же закономерностям, что и при обработке VT1-0. А именно, наименьшие значения шероховатости получаются при использовании шара малого диаметра (в нашем случае \varnothing 5 мм) (рис. 5, а; рис. 6). Видно также, что при обработке VT22, как и при обработке сплава VT1-0, с увеличением диаметра шара влияние подачи на шероховатость уменьшается (рис. 7).

Отличие состоит в том, что во всех рассмотренных случаях более четко просматривается влияние силы прижима инструмента и подачи на шероховатость. А именно, при увеличении силы значение Ra/Ra_0 уменьшается, а при увеличении подачи — увеличивается.

На рис. 8 приведено распределение микротвердости в поверхностном слое детали из VT22

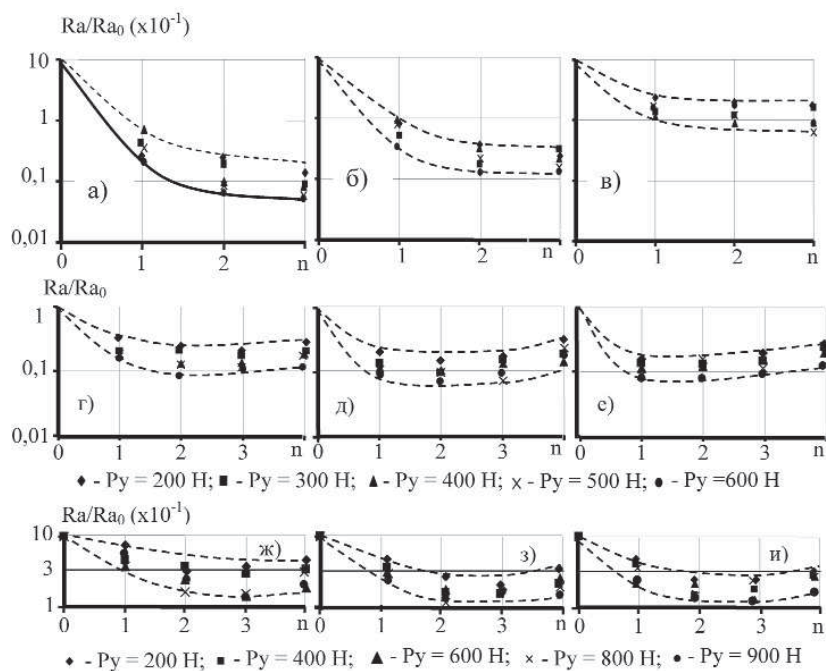


Рис. 5. Зависимость относительной шероховатости от количества проходов при накатывании детали из ВТ22 при различных технологических режимах:

а) $d_{ш}=5$ мм, $S=0,07$ мм/об.; б) $d_{ш}=5$ мм, $S=0,14$ мм/об.; в) $d_{ш}=5$ мм, $S=0,28$ мм/об.;
 г) $d_{ш}=8$ мм, $S=0,07$ мм/об.; д) $d_{ш}=8$ мм, $S=0,14$ мм/об.; е) $d_{ш}=8$ мм, $S=0,28$ мм/об.;
 ж) $d_{ш}=13,5$ мм, $S=0,07$ мм/об.; з) $d_{ш}=13,5$ мм, $S=0,14$ мм/об.; и) $d_{ш}=13,5$ мм, $S=0,28$ мм/об.

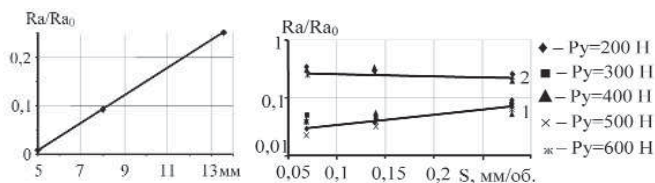


Рис. 6. Зависимость Ra/Ra_0 от диаметра шара после 2-х циклов обработки ВТ22 с подачей $S=0,07$ мм/об. при $P_y=600$ Н

Рис. 7. Зависимость Ra/Ra_0 от подачи после 2-х проходов обкатывания ВТ22 шаром $\varnothing 5$ мм (1) и 13,5 мм (2)

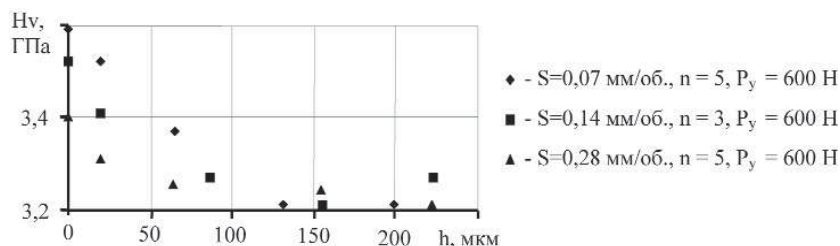


Рис. 8. Распределение микротвердости в поверхностном слое детали из ВТ22 после накатывания шаром $\varnothing 5$ мм из ШХ15 по различным технологическим режимам

после накатывания стальными шарами $\varnothing 5$ мм по разным технологическим режимам. Очевидно, что при накатывании сплава ВТ22 возможно получить увеличение поверхностной микротвердости в 1,1 раза и глубину упрочненного слоя до 100 мкм.

Различия в формировании шероховатости при обработке сплавов ВТ1-0 и ВТ22 при использовании шаров $\varnothing 5$ мм, а также разницу в глубине слоя деформационного упрочнения можно объяснить большим содержанием легирующих элементов в сплаве ВТ22 и, как следствие, меньшей его пластичностью (относительное удлинение ВТ1-0 – 30%, ВТ22 – 10% – ГОСТ 19807-91).

Выводы

1. При накатывании деталей из ВТ1-0 и ВТ22 можно отметить следующие общие закономерности формирования шероховатости:

- при исходной шероховатости Ra 5–7 мкм возможно получить шероховатость Ra 0,05–0,07 мкм;
- с точки зрения получения минимальных значений шероховатости наиболее эффективным является применение шаров малого диаметра;

- в исследованном диапазоне технологических режимов минимальные значения шероховатости достигаются после двух проходов, увеличение количества проходов более 2–3-х приводит к увеличению Ra/Ra_0 вследствие перенаклепа и шелушения.

2. При накатывании ВТ1-0 шаром $\varnothing 5$ мм при подаче менее 0,14 мм/об изменение силы P_y в диапазоне 200–600 Н на величину шероховатости практически не влияет, при накатывании ВТ22 во всех случаях увеличение силы прижима инструмента (P_y) приводит к снижению шероховатости.

3. При накатывании сплава ВТ1-0 достигается увеличение поверхностной микротвердости (HV/HV_0) в 1,6 раза и глубина упрочненного слоя до 400 мкм, при накатывании сплава ВТ22 – $HV/HV_0 = 1,1$ и глубина упрочненного слоя до 100 мкм. При этом:

- с увеличением подачи поверхностная микротвердость уменьшается;
- количество проходов на глубину упрочненного слоя практически не влияет;
- с увеличением силы прижима инструмента микротвердость поверхностного слоя и глубина слоя деформационного упрочнения увеличиваются.

Литература

1. *Смелянский В. М., Колеватов В. В.* Технологическое управление качеством поверхностного слоя при обкатывании титановых сплавов // Вестник машиностроения. 2001. № 9. – С. 51–54.
2. *Сулима А. М., Евстигнеев М. И.* Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: «Машиностроение», 1974.
3. *Горохов В. А.* Чистовая обработка титановых сплавов. – М.: «Машиностроение», 1975. – 109 с.
4. *О выборе* технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из титановых сплавов / О. А. Розенберг, Е. А. Пащенко, С. Е. Шейкин, И. Ю. Ростоцкий // Технологические системы. – 2007. – № 2(38). – С. 27–32.
5. *До питання* розробки технологічних змащень для обробки деталей з титанових сплавів деформуючим протягуванням / Шейкин С. Е., Шило А. Ю., Гаврилова В. С. Ростоцкий І. Ю. // Вісник Житомирського інженерно-технічного інституту. – Житомир, 2009. – № 2(49). – С. 3–7.
6. *О выборе* технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из титановых сплавов / Розенберг О. А., Пащенко Е. А., Шейкин С. Е., Ростоцкий И. Ю. // Технологические системы. – 2007. – № 2(38). – С. 27–32.
7. *Розенберг О. А.* Механика взаимодействия инструмента при деформирующем протягивании. Киев: Наукова думка, 1981. – 288 с.
8. *Пашиев Д. Д.* Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: «Машиностроение», 1978. – 152 с.
9. *Иголкин А. И.* Титан в медицине (Электронный ресурс) / А. И. Иголкин // Титан – 1993. – Режим доступа к журн.: <http://www.titanmet.ru>.
10. *Инструкция* ВИАМ № 685-76 „Термообработка титановых сплавов” ПИ1.2.051-78 Особенности применения титанового сплава ВТ22.
11. *Смелянский В. М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.