

УДК.621.919

*Шейкин С.Е., Ростоцкий И.Ю., Ефросинин Д.В., Сергач Д.А.*

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

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДАМИ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

*Показаны некоторые особенности применения деформационных технологий для обработки деталей из титановых сплавов, широко используемых в машиностроении, авиакосмической отрасли и медицине. Приведены результаты распределения микротвердости в поверхностном слое заготовок, особенности изменения структуры поверхностного слоя и влияния технологических режимов на шероховатость обработанной поверхности при использовании различных схем холодного пластического деформирования.*

Ключевые слова: титановый сплав; холодное поверхностное пластическое деформирование; шероховатость; упрочнение; микроструктура; технологическая смазка; зона деформационного упрочнения; степень деформации.

Титан и его сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов в авиации и космонавтике, в устройствах, работающих при криогенных температурах, в приборостроении, химической промышленности, медицине. Титан имеет самую большую удельную прочность из всех конструкционных материалов, не токсичен, обладает исключительной стойкостью к коррозии и эрозии, превышающей стойкость нержавеющей стали.

В авиационной и космической промышленности существует большая группа осесимметричных деталей из титановых сплавов (пневмо- и гидроцилиндры, штоки и др.). Развитие данных отраслей требует создания новых и совершенствования известных методов обработки и упрочнения рабочих поверхностей таких деталей, с целью повышения их эксплуатационных свойств.

Холодное поверхностное пластическое деформирование (ХППД) является эффективным способом повышения долговечности деталей машин. Большие значения относительной опорной длины профиля микронеровностей, малая их высота, наличие слоя деформационного упрочнения и остаточных сжимающих напряжений в нём повышают сопротивление усталостным нагрузкам, износостойкость и долговечность.

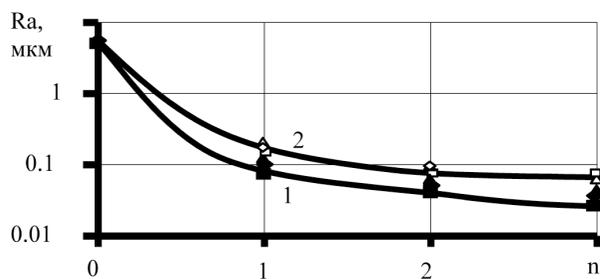
Однако применение методов ХППД при обработке деталей из титановых сплавов в настоящее время связано со значительными трудностями вследствие повышенной их склонности к схватыванию практически со всеми инструментальными материалами. Это дает основание отнести их к ряду труднодеформируемых.

При обработке титановых сплавов наиболее легко реализуются методы ХППД, в основе которых лежит трение качения [1], в частности, накатывание роликами и шарами.

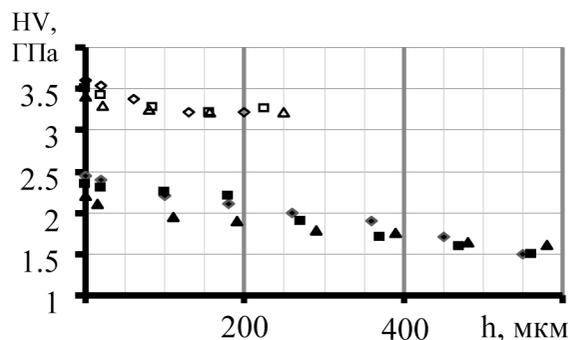
Особенностью накатки роликами является наличие принудительной оси вращения, следствием чего является большая доля трения скольжения по сравнению с обкаткой шарами. Учитывая указанные выше особенности, при обработке титановых сплавов целесообразно применять методы, где трение скольжения сведено до минимума, т. е. накатывание шарами. Кроме того, данная схема позволяет применять меньшие усилия, что снижает вероятность деформирования маложестких деталей [1, 2].

Экспериментально установлено, что при накатывании поверхности сплавов ВТ 1-0 и ВТ6, полученной токарной обработкой, возможно получить шероховатость  $\sim 0,05 - 0,07$  мкм (рис. 1). 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 ВТ 22 –  $HV/HV_0 = 1,1$  и глубина упрочненного слоя до 100 мкм (рис. 2). Подробнее эти результаты описаны в [3].

Для обработки деталей сложной формы разрабатываются специальные методы ХППД. Для накатывания полносферических деталей, с целью создания значительных деформаций в поверхностном слое и, следовательно, существенного измельчения структуры разработана технологическая схема накатывания плоскими поверхностями [4] (рис. 3). Сферическое изделие 1 размещают в цилиндрической камере 2 и обрабатывают вращающимся инструментом 3 с эксцентриситетом  $e$  и нагрузкой  $P$ .

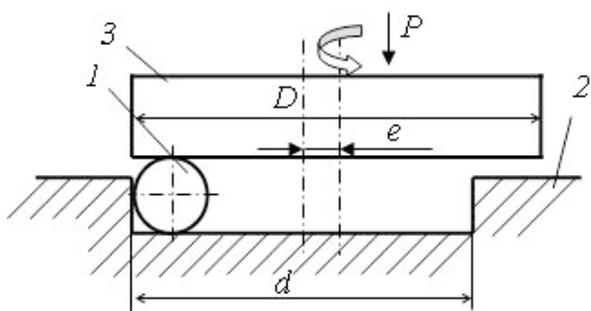


**Рис. 1.** Зависимость шероховатости поверхности от количества проходов при накатывании деталей из ВТ1-0 (1) и ВТ22 (2) при различных технологических режимах при  $d_w = 5$  мм,  $S = 0,07$  мм/об.



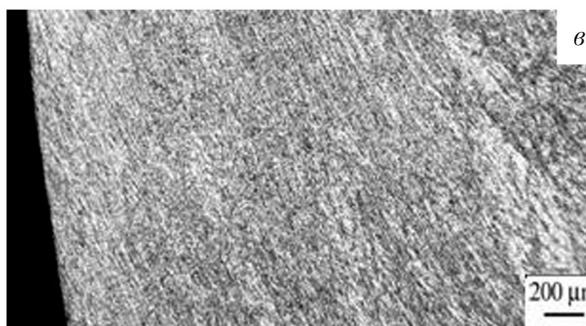
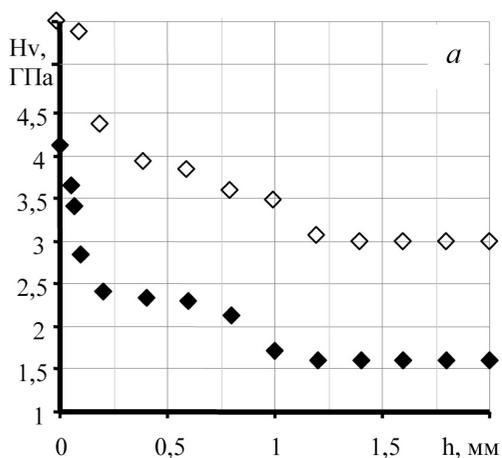
**Рис. 2.** Зависимость микротвердости поверхности от глубины слоя деформационного упрочнения при накатывании деталей из ВТ1-0 и ВТ22 при различных технологических режимах при  $d_w = 5$  мм,  $S = 0,07$  мм/об.

▲ – P = 200 Н, ВТ1-0; ◆ – P = 400 Н, ВТ1-0; ■ – P = 500 Н, ВТ1-0; △ – P = 200 Н, ВТ22; ◇ – P = 400 Н, ВТ22; □ – P = 500 Н, ВТ22;



**Рис. 3.** Схема накатывания сферической заготовки плоскими поверхностями

На рис. 4 приведены фотографии структуры и распределение микротвердости в поверхностном



**Рис. 4.** Распределение микротвердости в поверхностном слое (а) и структура поверхностного слоя сферических заготовок после накатывания (б–ВТ6; в–ВТ1-0.)

плоскими поверхностями видны характерные изменения структуры в поверхностном слое обрабатываемых деталей. По мере приближения к поверхности наблюдается измельчение зерен, проявляется текстура, что свидетельствует о значительной степени деформации. Зона деформационного упрочнения в обоих случаях распространяется на глубину до 1 мм.

Очевидно, что технологическая схема накатывания плоскими поверхностями обеспечивает упрочнение поверхностного слоя сферических заготовок из VT1-0, VT6 в два и более раз.

Технология накатывания сферических заготовок плоскими поверхностями может быть применена для получения мелкодисперсной и наноструктуры деформационного происхождения в поверхностном слое.

Наиболее проблематично при обработке титановых сплавов применение таких технологических схем ХППД, при реализации которых в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием имеет место трение скольжения в условиях высоких контактных давлений. Например, выглаживание и деформирующее протягивание. При деформирующем протягивании через обрабатываемое отверстие пропускают ряд деформирующих колец, где каждое кольцо больше предыдущего на определенную величину, называемую натягом (рис. 5). Решить эту проблему возможно разработкой и применением эффективных технологических смазок, однако она к настоящему времени в полной мере не решена. Технологические смазки, удобные в применении (жидкие, легко наносимые и удаляемые) и способные гарантированно предотвратить схватывание в таких процессах, не созданы.

Необходимо отметить, что при деформирующем протягивании трение между инструментом и обрабатываемой деталью может иметь положительный эффект, способствуя деформационному упрочнению поверхностного слоя и снижению высоты микронеровностей. Поэтому в некоторых случаях есть смысл увеличивать работу трения. Это возможно, если кроме поступательного движения инструмента сообщить еще и вращательное.

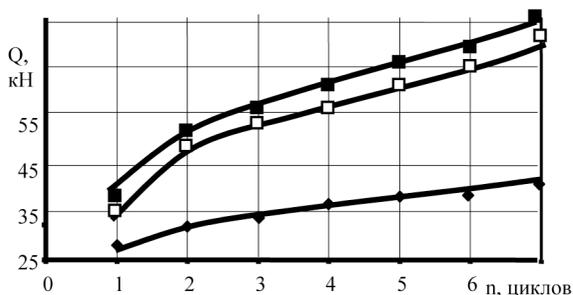


Рис. 6. Зависимость осевой силы от количества циклов при деформирующем протягивании титановых сплавов VT 6 и VT 22 с разработанной модифицированной твердой смазкой ■ – VT 22; □ – VT 6; ◆ – VT 1-0

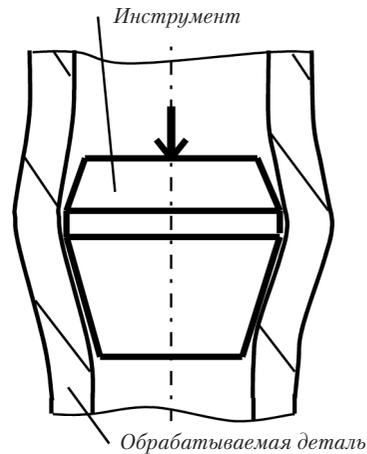


Рис. 5. Схема деформирующего протягивания

В настоящее время процесс деформирующего протягивания деталей из титановых сплавов может быть реализован только при условии применения твердых смазок, которые весьма неудобны в применении. Их нанесение перед обработкой и удаление после неё достаточно трудоёмко. Применение таких смазок экономически может быть оправдано в том случае, когда необходимо максимально приблизить размеры заготовки к размерам готовой детали и, таким образом, свести к минимуму отход дорогостоящего материала в стружку. При этом практика показала, что твердые смазки, традиционно применяемые для обработки склонных к схватыванию сталей, при обработке титановых сплавов неэффективны.

В ИСМ НАН Украины разработана твердая смазка для обработки титановых сплавов деформирующим протягиванием на основе диановой эпоксидной смолы и коллоидного графита, сохраняющая работоспособность до значения контактных давлений 1,6 ГПа [5]. Эксперименты показали, что введение в состав данной смазки элементов кремнийорганики и высокодисперсного углеродного наполнителя позволяют расширить её технологические возможности.

На рис. 6, 7 приведены зависимости осевых сил и контактного давления соответственно, полученные при деформирующем протягивании титановых

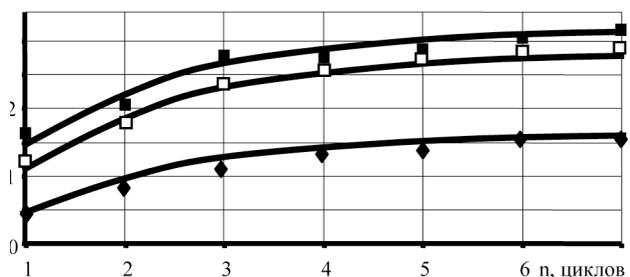
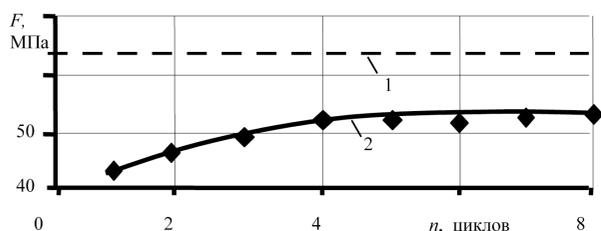


Рис. 7. Зависимость контактных давлений от количества циклов при деформирующем протягивании титановых сплавов VT 6 и VT 22 с разработанной модифицированной твердой смазкой ■ – VT 22; □ – VT 6; ◆ – VT 1-0

деталей с модифицированной смазкой. Видно, что данная смазка работоспособна при контактном давлении 3,1 ГПа и более.

Значение удельной силы трения модифицированной смазки при многоцикловом деформирующем протягивании сплава ВТ 1-0 приведено на рис. 8. Там же пунктирной линией (1) для сравнения показано значение удельной силы трения твердой смазки на основе дисульфида молибдена [6], применяемой при протягивании склонных к схватыванию нержавеющей сталей.

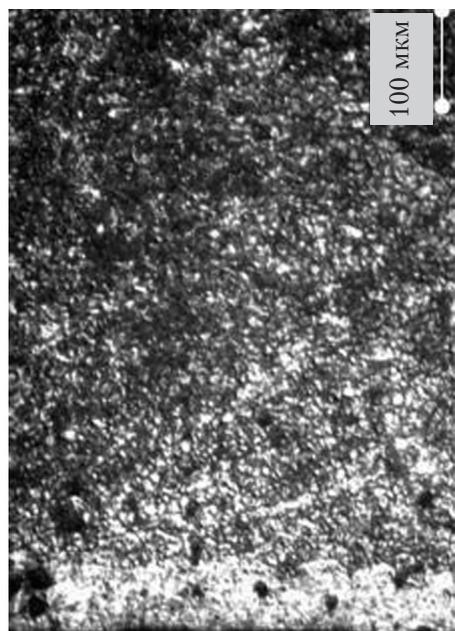
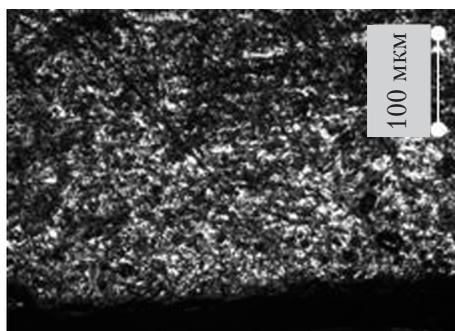
Влияние вращения инструмента на формирование слоя деформационного упрочнения хорошо



**Рис. 8.** Зависимость удельной силы трения от количества циклов деформирования: 1 – удельная сила трения для смазки на основе дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ )  $F = 65,3$  МПа, 2 – удельная сила трения для разработанной смазки 53 МПа

видно на примере протягивания втулок из ВТ1-0 с отверстием Ш 35 мм со стенкой толщиной 11 мм после 20 циклов обработки с натягом  $a = 0,1$  мм (рис. 9). На рис. 9, в приведена исходная структура титана. При протягивании без вращения слой деформационного упрочнения (рис. 9, б), и не превышает 100 мкм. После деформирующего протягивания с вращением инструмента (рис. 9, в) структура основного металла полностью рекристаллизована. Слой упрочнения по глубине составляет 600–650 мкм. Этот слой имеет меньший размер рекристаллизованного зерна. По мере приближения к границе основного металла в упрочненном слое встречаются все больше и больше зерен с размером зерна основного металла. У обработанной поверхности наблюдается слой толщиной 160 мкм, где зеренная структура разрушена. От 160–600 мкм структура имеет пластинчатоглобулярное строение.

Исходя из этого можно сделать вывод, что деформирующее протягивание с вращением инструмента можно применять в случаях, когда необходимо получить слой деформационного упрочнения значительной глубины и твердости.



**Рис. 9.** Микроструктура образцов из ВТ 1-0: а) исходная микроструктура; б) протягивания без вращения инструмента; в) протягивания с вращением инструмента

## Выводы:

1. При накатывании шарами деталей из ВТ1-0 и ВТ 22 можно отметить следующее:

– при исходной шероховатости поверхности Ra 5–7 мкм возможно получить шероховатость поверхности Ra 0,05 – 0,07 мкм;

– при накатывании ВТ1-0 возможно достичь увеличения поверхностной микротвердости ( $H_v/H_{v0}$ ) до 1,6 раза при глубине слоя деформационного упрочнения до 400 мкм, при накатывании ВТ22 – до 1,1 при глубине до 100 мкм.

2. При накатывании сферических деталей плоскими поверхностями максимальная микротвердость локализована в тонком (менее 50 мкм) поверхностном слое. Характер структуры свидетельствуют о значительной степени деформации (глубиной 1мм) в поверхностном слое шара. Технология накатывания сферических заготовок плоскими поверхностями перспективна для получения мелкодисперсной и наноструктуры в поверхностном слое.

3. Технологическая смазка на основе диановой эпоксидной смолы и коллоидного графита с высокодисперсными наполнителями позволяет производить многоцикловое деформирующее протягивание деталей из титановых сплавов при контактных давлениях до 3,1 ГПа.

## Литература

- [1] Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М., «Машиностроение», 1978. – 152 с.
- [2] Горохов В. А. Чистовая обработка титановых сплавов. М., «Машиностроение», 1975. – 109 с.
- [3] О шероховатости обработанной поверхности и упрочнении поверхностного слоя при накатывании деталей из ВТ1-0 и ВТ22 стальными шарами [Розенберг О. А., Моляр А. Г., Шейкин С. Е., Ростоцкий И. Ю., Ефросинин Д. В.]. – «Технологические системы», 2(38)/2007. – 2010. – С. 27–32.
- [4] Пат. 92693 Україна, МПК(2009) В24В 39/00. Спосіб обробки сферичних виробів поверхневим пластичним деформуванням / Ю. А. Цеханов, С. Є. Шейкін. – Опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.
- [5] К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ 1-0. – [Розенберг О. А., Пашенко Е. А., Шейкин С. Е., Ростоцкий И. Ю.]. – «Технологические системы», 2(38)/2007. – 2007. – С. 27–32.
- [6] Крицкий А. Д. Особенности разработки твердо-сплавных деформирующих протяжек для обработки отверстий в деталях из труднообрабатываемых деталей и сплавов: Автореферат диссертации кандидата технических наук. – Киев, 1983. – 26 с.

Sheykin S. Ye., Rostotskiy I. Yu., Iefrosinin D. V., Sergach D. A.

V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine

### SOME PARTS OF PROCESSING OF TITANIUM ALLOYS BY COLD PLASTIC DEFORMATION

*The features of the application of deformation technology for machining of titanium alloys are widely used in engineering, aerospace and medicine are shows. The results of microhardness distribution in the surface layer of the workpiece, especially changes in the structure of the surface layer and the influence of process conditions on the surface finish with it by using a variety of schemes for cold plastic deformation.*

*Keywords:* titanium alloy; cold surface plastic deformation; surface roughness; hardening, microstructure; lubrication technology; the zone of strain hardening; the degree of deformation.

#### References

- [1] Papshev D. D. The finishing and strengthening processing surface plastic deformation. M., "Engineering", 1978. – 152 p. (In Russian)
- [2] Gorohov V. A. The finishing titanium alloys. M., "Mashinostoroenie", 1975. – 109 p. (In Russian)
- [3] On the surface finish and hardening of the surface layer during cold-forming parts of Grade 1 and Grade 5 steel balls [Rosenberg O. A., Molar A. G., Sheykin S. E., Rostotskiy IY, Iefrosinin D.V.]. – Technological Systems, 2(38) / 2007. P. 27–32. (In Russian)
- [4] Pat. 92693 Ukraine, IGC(2009)V24V39/00. Sposib obrobki sphericities virobiv poverhnevim plasticity of deformuvannyam / Yu. A. Tsekhanov, S. Ye. Sheykin. – Publ. 25.11.2010, Bull. Number 22. (In Ukrainian)
- [5] On the question of the development process lubricants for deforming pull parts from alloy Grade 1. – [Rosenberg O. A., Paschenko Ye. A., Sheykin S. Ye., Rostotskiy I. Yu.]. – Technological Systems, 2(38) / 2007. P. 27–32. (In Russian)
- [6] Kritskiy A. D. Features of the development of carbide -distorting broaches for holes in the details from the hard parts and alloys: the dissertation of the candidate of technical sciences. – Kiev, 1983. – 26 p. (In Russian)