

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И РЕЛАКСАЦИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

© 2012 Н. Д. Папшева, О. М. Акушская

Самарский государственный технический университет

Приведены результаты исследования влияния ультразвукового упрочнения на релаксацию остаточных напряжений и деформационного упрочнения в титановых сплавах. Показано влияние параметров обработки на интенсивность напряжений и деформаций.

Релаксация, остаточные напряжения, деформационное упрочнение, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций.

В современном машиностроении, а также в авиа- и ракетостроении всё более широкое применение находят титановые сплавы, обладающие особыми физико-механическими свойствами, которые определяют их эксплуатационные характеристики. Повышение качества и надёжности работы изделий из титановых сплавов в настоящее время достигается созданием новых сплавов, совершенствованием конструкций изделий, а также внедрением прогрессивных технологических процессов механической обработки [1].

Перспективным направлением повышения эксплуатационной долговечности деталей из титановых сплавов является поверхностное пластическое деформирование, осуществляемое различными методами, в том числе ультразвуковым упрочнением (УЗУ) и накатыванием шариком.

При ультразвуковом упрочнении жёстко закреплённым сферическим индентором возможны два случая взаимодействия: без отрыва индентора от обрабатываемой поверхности и с разрывом контакта. Изменяя режимы обработки (амплитуду и частоту колебаний, скорость), можно оптимизировать условия взаимодействия инструмента и заготовки, повышая эффективность воздействия ультразвука.

Ультразвуковые колебания способствуют уменьшению деформирующего усилия при упрочнении и снижении сопротивления пластической деформации [2]. Для титановых сплавов в зависимости от фазового со-

става показатель дополнительного энергетического воздействия составляет

$$K_3 = \frac{\sigma_{o,z}}{\sigma_{o,z-y}},$$

где $\sigma_{o,z}$ - предел текучести в обычных условиях,

$\sigma_{o,z-y}$ - предел текучести при ультразвуковом воздействии.

При поверхностном пластическом деформировании под действием внешних сил происходит интенсивная пластическая деформация, которая определяется физико-механическими характеристиками материала. Исследование напряжённо-деформированного состояния в зоне контакта проводили в программном комплексе ANSYS с использованием метода конечных элементов. По результатам исследований внедрения шарика в полуплоскость при УЗУ установлено, что с возрастанием деформирующего усилия P_n от 50 до 250 Н глубина залегания деформированного слоя возрастает в 1,5 раза. Определена зависимость относительных деформаций в поверхностном слое сплавов BT9 и OT4 от усилия упрочнения при накатывании шариком. При усилии $P_n = 500$ Н величина относительной деформации очень мала и составляет 0,015% (рис. 1). С возрастанием P_n происходит увеличение относительной деформации и при $P_n = 2500$ Н величина относительной деформации составляет 11%. Интересной особенностью является то, что максимальные деформации на эпюрах расположены на некотором расстоянии от поверхности, что согласуется с опытными данными, полученными ранее.

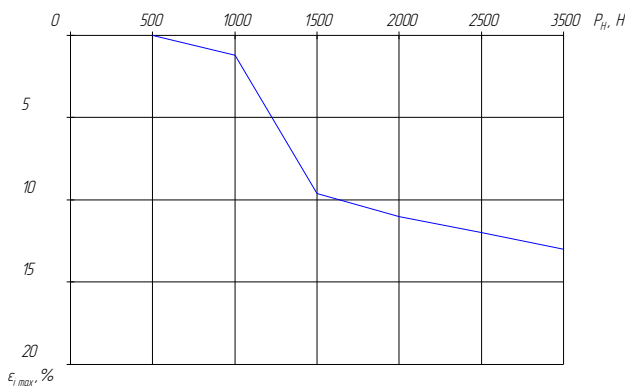


Рис.1. Относительные деформации в поверхностном слое сплава ВТ9 при накатывании шариком

Максимальные напряжения также определяются условиями обработки, важнейшим из которых является P_n . При возрастании P_n до 2000 Н происходит увеличение максимальных напряжений до наибольшего значения 1742 МПа (рис. 2). При дальнейшем увеличении P_n до 2500 Н происходит незначительное снижение максимальных напряжений до 1739 МПа. При этом остаточные напряжения возросли с 17 до 1742 МПа, а глубина залегания с 220 до 425 мкм. Таким образом, при внедрении сферического индентора область максимальных напряжений, в которой начинает зарождаться пластическая деформация, располагается на некоторой глубине от поверхности. Поэтому можно ожидать, что в вышележащей области, непосредственно прилегающей к поверхности, пластическая деформация начнётся позже и будет протекать менее интенсивно [3].

Результаты определения интенсивности деформаций ϵ_i в зависимости от усилия упрочнения показали, что с увеличением P_n от 500 Н до 2500 Н при накатывании шариком ϵ_i возрастает до 0,096, а при ультразвуковом упрочнении с возрастанием P_n от 50 до 250 Н - до 0,12. Это связано с тем, что скорость деформирования при УЗУ значительно выше, что является следствием быстрого распространения фронта давления, локализованного в небольшом объёме.

Как известно, высокоскоростная и квазистатическая деформации по-разному воздействуют на кристаллическую решётку. При высокоскоростной деформации имеет место перераспределение влияния отдельных факторов на физико-механические характеристики материала. Поэтому ультразвуковое

упрочнение характеризуется более мелкозернистой структурой и высокой плотностью дислокаций. Наибольшие значения интенсивности напряжений и деформаций находятся на некотором расстоянии от поверхности.

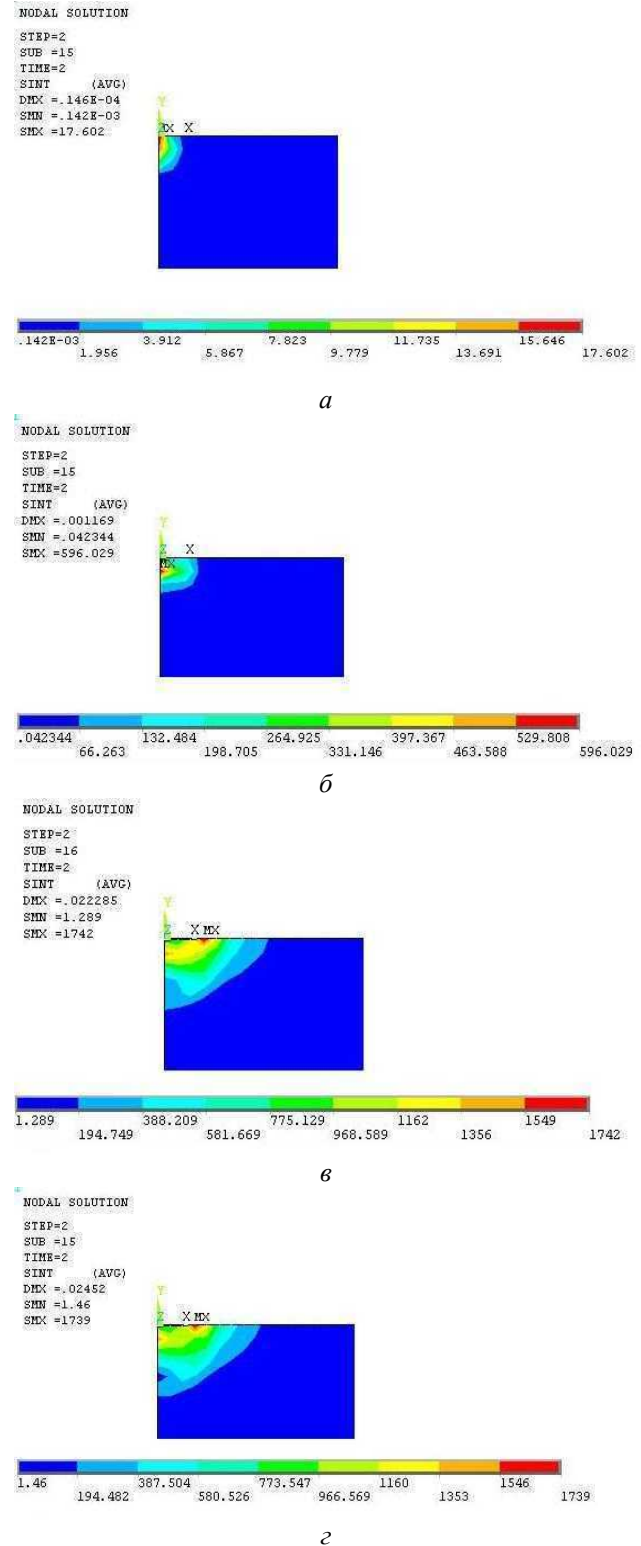


Рис.2. Влияние усилия упрочнения на максимальные напряжения, сплав ВТ9:
а- $P_n = 500$ Н, б- 1000 Н, в- 2000 Н, г- 2500 Н

Согласно гипотезе наибольших касательных напряжений, интенсивность сдвиговых явлений (деформаций) хорошо согласуется с характером изменения максимальных касательных напряжений. Это, в частности, видно из рис. 3,а,б, где приведены зависимости главных напряжений σ_x , σ_y и σ_z для различных точек оси z , то есть в зависимости от отношения $\frac{z}{r}$, где r - радиус отпечатка и аналогичные графики для максимальных касательных напряжений τ_x , τ_y и τ_z .

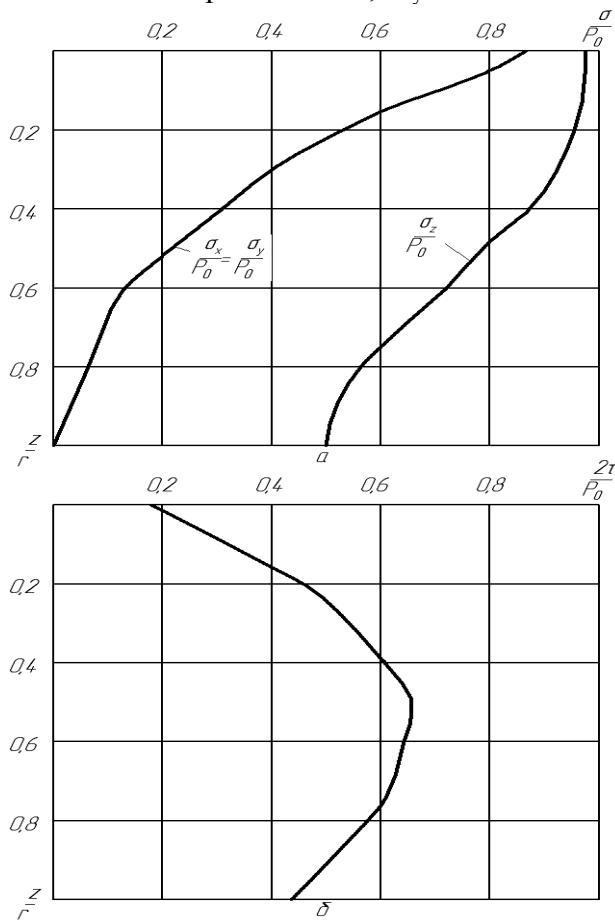


Рис.3. Распределение главных (а) и касательных (б) напряжений при упрочнении сплава ВТ9

Как видно, максимальные значения главных напряжений имеют место в точке касания шара с полупространством и по мере удаления вдоль оси z снижаются. Для касательных напряжений закономерность другая - максимум располагается в точке $\frac{z}{r}=0,5$. Характер изменения максимальных касательных напряжений сохраняется и в том случае, когда некоторый объем упрочняемого металла под внедряемым шаром перейдет

в пластическое состояние. Более того, согласно гипотезе максимальных касательных напряжений, можно предположить, что наибольшие деформации (сдвиги) возникнут также в области действия максимальных касательных напряжений, т.е. на расстоянии от поверхности, равном $z = 0,5 r$.

Детали силовых агрегатов из титановых и жаропрочных сплавов в условиях эксплуатации подвергаются воздействию рабочих температур, а также статических и циклических перегрузок. Под влиянием этих факторов с течением времени в деталях происходит развитие процессов возврата и рекристаллизации, т.е. наблюдается разупрочнение поверхностного слоя за счёт различного рода повреждений. Состояние поверхностного слоя, обусловленное механической обработкой, как известно, оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства и прежде всего на усталостную прочность. Остаточные напряжения и степень упрочнения поверхностного слоя в условиях циклического нагружения и рабочих температур могут влиять на сопротивление металла усталости.

Релаксация напряжений по современным представлениям является результатом как сдвигово-дислокационных, так и диффузионных процессов. Факторы, влияющие на протекание процесса релаксации напряжений, можно разделить на внутренние (химический состав, микро- и макроструктура, способ выплавки, степень деформационного упрочнения, остаточные напряжения и т. д.) и внешние (условия нагружения, время, температура). Поэтому проблема устойчивости деформационного упрочнения и остаточных микронапряжений после ультразвукового упрочнения в зависимости от температуры и продолжительности нагрева имеет большое значение.

Релаксация остаточных напряжений и разупрочнение деформированного поверхностного слоя после изотермического нагрева в вакууме изучались на образцах из титановых сплавов ВТ9 и ОТ4. Исследовалась стабильность остаточных напряжений и деформационного упрочнения в поверхностном слое образцов после упрочнения с оптимальными режимами, которые были определены экспериментально. Для УЗУ - нормальное

усилие $P_n=250$ Н, амплитуда колебаний $\xi=15$ мкм, скорость $V_u=25$ м/мин, подача $S=0.07$ мм/об, диаметр шарика $d_{ш}=5$ мм; для накатывания шариком - $P_n=500-750$ Н, $V_u=25$ м/мин, $S=0.07$ мм/об, $d_{ш}=5$ мм. Таким образом, релаксация остаточных напряжений исследовалась в зависимости как от внешних, так и от внутренних факторов.

Исследования показали, что независимо от метода упрочнения в обоих сплавах при нагреве до $T=500^\circ\text{C}$ происходит релаксация остаточных напряжений (рис. 4), которая зависит от их начального уровня. Так, разность максимальных значений остаточных напряжений после ультразвукового упрочнения и накатывания шариком сплава ВТ9 составила 50-80 МПа, в результате нагрева указанная разность почти не изменилась, для сплава ОТ4 имеет место примерно аналогичная зависимость. Установлено также, что небольшая степень релаксации происходит в первые 2 часа выдержки (25%), после 50 часов релаксация составляет 37%, то есть увеличение выдержки в 25 раз повысило релаксацию лишь в 1,5 раза.

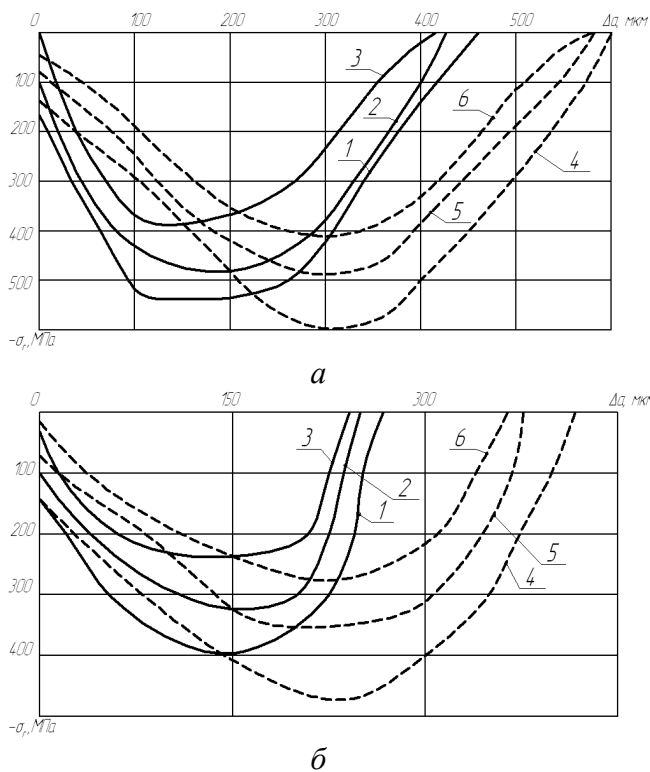


Рис. 4. Релаксация остаточных напряжений в сплавах ВТ9(а) и ОТ4 (б) при $T=500^\circ\text{C}$:
1,2,3- ультразвуковое упрочнение;
4,5,6- накатывание шариком;
2,5- выдержка 2 часа; 3,6- выдержка 50 часов

Итак, наблюдается общая закономерность изменения напряжения от времени выдержки в процессе релаксации - резкое падение напряжения в первый весьма короткий момент времени и умеренная скорость их снижения в течение второго, длительного промежутка времени.

Изменение степени деформационного упрочнения при изотермическом нагреве определялось методом измерения микротвёрдости. Анализ данных свидетельствует о том, что для сплава ВТ9 и ОТ4 уменьшение степени деформационного упрочнения, как и релаксация напряжений, зависит от первоначального уровня. Установлено, что максимальная степень деформационного упрочнения при накатывании шариком составляла примерно 30% , а при ультразвуковом упрочнении 15%.

Исследования показали, что наибольшее падение микротвёрдости имеет место, как и в случае релаксации напряжений после двух часов выдержки. Это вполне закономерно, так как формирование остаточных напряжений связано с пластической деформацией поверхностного слоя, которая может быть оценена деформационным упрочнением, т. е. процессы упрочнения и формирования остаточных напряжений имеют общую природу.

Для образцов из сплава ВТ9 после ультразвукового упрочнения снижение микротвёрдости после 2 часов выдержки составило 2%, а после 50 часов выдержки – 8%, т.е. при увеличении времени выдержки в 25 раз степень упрочнения уменьшается в 4 раза.

Такое же снижение микротвёрдости наблюдается на образцах, упрочненных обкаткой. После 50 часов степень уменьшается на 8-9%.

Проведённые эксперименты позволили установить, что независимо от способа упрочнения наибольшая релаксация макронапряжений и разупрочнение деформированного слоя при данной температуре наблюдается в начальный момент нагрева. Выявлена взаимосвязь микронапряжений и степени наклёпа: релаксация напряжений сопровождается уменьшением степени деформационного упрочнения, что хорошо согласуется с современным представлением о кинетике

процесса возврата в деформированном металле при нагреве.

Библиографический список

1. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст]: справочник / Л.Г.

Одинцов. -М.: Машиностроение, 1987.-328 с.

2. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов [Текст] / А.И. Марков. - М.: Машиностроение, 1989. - 269 с.

3. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке [Текст] / [М.Ф. Вологин и др.] - М.: Машиностроение, 2002.- 264 с.

INFLUENCE OF METHODS OF STRENGTHENING TECHNOLOGY ON THE STRESS-STRAIN STATE AND RELAXATION OF RESIDUAL STRESSES IN TITANIUM ALLOYS

© 2012 N. D. Papsheva, O. M. Akushskaya

Samara State Technical University

The results of studies of the effect of ultrasonic hardening of relaxation of residual stresses and strain hardening in titanium alloys. Shows the influence of processing parameters on the intensity of the stresses and strains.

Relaxation, residual stresses, strain hardening, stress intensity, the intensity of deformation.

Информация об авторах

Папшева Нина Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного технического университета. E-mail: isap@samgtu.ru. Область научных интересов: ультразвуковая интенсификация технологических процессов.

Акушская Ольга Мордуховна, старший преподаватель Самарского государственного технического университета. E-mail: olgaaku@gmail.com. Область научных интересов: ультразвуковая интенсификация технологических процессов.

Papsheva Nina Dmitrievna, candidate of technical science, assistant professor of Samara State Technical University. E-mail: isap@samgtu.ru. Area of Research: ultrasonic intensification of technological processes.

Akushskaia Olga Morduhovna, senior lecturer of Samara State Technical University. E-mail: olgaaku@gmail.com. Area of Research: ultrasonic intensification of technological processes.