ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО НАНОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

PROBLEMS OF MODERN NANOMATERIALS SCIENCE

УДК 615.7/9
DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-91-98

Сергей Яковлевич Березин[1]**,**
доктор технических наук, профессор,
Забайкальский государственный университет
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30),
e-mail: berlog_ berezin2011@mail.ru

Юрий Игоревич Свиридов,
аспирант,
Забайкальский государственный университет
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30),
e-mail: berlog_ berezin2011@mail.ru

Активация внутреннего резьбообразования концентрированными потоками ультразвуковой акустической энергии

Рассмотрен опыт применения мощного концентрированного ультразвука для активации процессов сборки резьбовых соединений с натягом и резьбообразования. Представлен анализ возможных механизмов действия ультразвуковых колебаний (УЗК) на дислокационную природу пластической деформации. Представлены конструкции технологической оснастки с концентраторами, обладающими возможностью суммирования УЗК с разными частотами и амплитудами. Приведены результаты экспериментальных исследований действия концентрированных УЗК на крутящие моменты резьбообразования, а также влияния высокочастотной компоненты УЗК и скорости обработки на силовые факторы процесса. Установлены экспериментальные зависимости для расчетов крутящих моментов в режиме действия концентрированных УЗК. Экспериментально установлены доли снижения моментов от действия базовой, т. е. низкочастотной компоненты УЗК и, соответственно, высокочастотной. Доказано, что применение концентрированных УЗК значительно снижает силовую напряженность процесса резьбообразования и повышает надежность операций.

Ключевые слова: резьбовое соединение, сборка, дислокации, напряжения, ультразвук, энергия, крутящий момент, волновод, метчик, модуляция, фокусирование, эксперимент

[1]С. Я. Березин – основной автор, является организатором исследования, формулирует выводы и обобщает итоги реализации коллективного проекта.

© **Березин С. Я., Свиридов Ю. И., 2016**

***Sergey Ya. Berezin*[1],**
Doctor of Engineering Science, Professor,
Transbaikal State University
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),
e-mail: berlog_berezin2011@mail.ru

Yuriy I. Sviridov,
Postgraduate Student,
Transbaikal State University
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),
e-mail: berlog_berezin2011@mail.ru

Activation of Internal Thread-Formation by Concentrated Streams of Ultrasonic Acoustic Energy

Experience of application of the strong concentrated ultrasonics for activation of assembly processes of screw connections with tension and a thread-forming is considered. The analysis of possible mechanisms of action of ultrasonic oscillations (USO) on the dislocation nature of plastic deformation is provided. Constructions of technology equipment with the wave concentrators for summing of USO with dfferent frequencies and amplitudes are provided. Results of the pilot researches of action of the concentrated USO on thread-forming torques are given and also we analyzed the inflence of a high-frequency component of USO and processing speed on force factors of process. The experimental dependences for calculations of torques in the mode of action of the concentrated USO are set. Lowering of the moments from action of a basic, i. e. low frequency component of USO and also high-frequency component is experimentally established. It is proved that application of the concentrated USO considerably reduces force strength of a thread-forming process and increases reliability of operations.

Keywords: screw joint, assembly, dislocations, strain, ultrasonic, energy, torque, waveguide, tap, modulation, focusing, experiment

Эффективность действия ультразвука на процессы резьбонарезания и резьбовыдавливания проявляется через дислокационную природу воздействия на деформируемую среду, а также через изменение структуры фрикционных взаимосвязей в резьбовом контакте, находящемся в акустическом поле. При деформации материала в статическом поле все большее число подвижных дислокаций задерживается на препятствиях кристаллической решетки, за счет чего материал упрочняется. Для освобождения дислокаций необходима внешняя энергия. Таким образом, уменьшение напряжений при воздействии ультразвука можно объяснить активацией задержанных дислокаций. Процесс происходит до тех пор, пока есть приток внешней энергии. Этим можно объяснить резкое увеличение напряжений при кратковременном выключении ультразвуковых колебаний.

М. С. Нерубай, Б. Л. Штриков, В. В. Калашников утверждают, что при «превышении амплитудой переменных напряжений некоторого порогового значения происходит отрыв дислокаций от точек закрепления и их необратимое движение, которое проявляется в виде коллективных эффектов — образования микросдивигов в виде линий и полос скольжения. Значение пороговой амплитуды обычно составляет 0,3–0,8 от предела текучести» [3].

Изменения механических свойств, происходящие в металлах и сплавах при ультразвуковой обработке, вызваны изменением их структуры. Ультразвуковые колебания (УЗК), интенсивность которых превышает некоторое пороговое значение, вызывают в материале размножение, перемещение и взаимодействие несовершенств кристаллического строения: дислокаций, вакансий, примесных атомов. Наряду с механической работой по совершению

[1]S. Ya. Berezin is the main author who has organized the study, formulated the conclusions and findings in realization of the group project.

процесса деформации, ультразвук вносит в деформируемую область дополнительную работу (энергию), которая расходуется на часть работы по формоизменению, изменению условий фрикционного взаимодействия, на тепловыделение, активизацию смазок и т. д.

Увеличение амплитуды УЗК приводит к снижению неоднородности деформации и вызывает генерацию большого числа новых дислокаций. Для каждого материала характерна интенсивность УЗК, вызывающая развитие множественного скольжения. При этом перемещение дислокаций происходит по многим направлениям и плоскостям, не участвующим в пластической деформации при статических нагрузках. На поверхности деталей, подвергнутых ультразвуковой обработке с интенсивностью выше пороговой, наблюдаются следы пластической деформации – полосы скольжения. Их количество возрастает с увеличением амплитуды и продолжительности УЗК. Все это вызывает повышение пластичности деформируемого материала (эффект Блага – Лангенеккера).

Установлено, что в изделиях, обработанных с УЗК, повышается концентрация несовершенств кристаллического строения. При этом воздействие колебаний малой мощности, ниже порогового значения, приводит к появлению полос скольжения в виде дислокационных петель или диполей. При достаточно высокой интенсивности образуются дислокационные сплетения и ячейки. В поликристаллах с малоподвижными границами ультразвук вызывает зернограничное проскальзывание.

Для каждого металла и условий обработки существует пороговое значение напряжения, создаваемого УЗК. Например, для алюминия при 20 °С оно составляет 7 МПа, меди – 12 МПа. Для большинства чистых металлов значения пороговых напряжений равны 0,4–0,5 предела текучести материала при его статической деформации. Обработка металлов ультразвуком с амплитудами, меньшими пороговых в течение коротких промежутков времени, не вызывает изменения свойств металла. Амплитуды выше пороговых значений могут привести к упрочнению металла, или разупрочнить его, если материал был упрочнен каким-либо другим способом (накатка, дробеструйный наклеп и т. д.).

С другой стороны, С. А. Кобелев, Д. В. Вольсков считают, что снижение предела текучести происходит в основном за счет миграции дислокаций, а не образования их по методу Франка — Рида. Энергетические затраты на образование дислокаций значительно больше, чем на перемещение уже имеющихся в материале структурных несовершенств в зону пластического течения [1]. По мнению данных авторов, расчет показывает, что при длине дислокационного отрезка $L = 10^{-2} - 10^{-4}$ см максимум дислокационного поглощения для металлов приходится на частоты от сотен килогерц до десятков мегагерц. Интенсивность УЗК при этом должна быть достаточной, чтобы, основываясь на модели Келера – Гранато – Люке, реализовывался амплитудозависимый гистерезис, как механизм дислокационного поглощения, при котором возможно перемещение дислокаций.

Проблематичность реализации данного принципа очевидна, т. к. существующие генераторные установки не позволяют обеспечить необходимые интенсивности промышленного ультразвука на мегагерцовом диапазоне и проверить указанное предположение можно только на специальных конструкциях УЗК преобразователей. Для этого было разработано устройство, позволяющее концентрировать (суммировать) УЗК с разной частотой и амплитудами (рис. 1).

На рис. 1а представлена конструкция, включающая магнитострикционный преобразователь ПМС 6-22, помещенный внутрь гильзы корпуса динамометра крутящего момента. На конце его волновода закреплен концентратор с 3 пьезоэлектрическими преобразователями П111-0,6-П16, закрепленными под углом 3° на гранях нижнего фланца концентратора. Они распределены по окружности через угол в 120°.

На рис. 1б представлен общий вид экспериментальной установки. На столе сверлильного станка 2А-150 закреплен динамометр крутящего момента с ультразвуковыми преобразователями. На верхнем торце концентратора закреплены тисы, удерживающие образцы, в отверстиях которых накатывается или нарезается резьба. Преобразователь ПМС 6–22 погружен внутрь гильзы динамометра, которая одновременно служит резервуаром для охла-

ждающей жидкости. Возбуждение преобразователя производит ультразвуковой генератор ИЛ10–2,0 в диапазоне частот 25–40 кГц. Пьезоэлектрические излучатели П111 подключаются к генератору УРСК-7Н-22. Он обеспечивают более высокую частоту УЗК, порядка 5 мГц. Такая конструкция концентратора УЗК позволяет получать суммированные колебания с общей амплитудой, равной

$$A = \sqrt{[A_1\cos(w_1t+\varphi_1)]^2 + [A_2\cos(w_2t+\varphi_2)]^2 + [A_1\sin(w_1t+\varphi_1)]^2 + [A_2\sin(w_2t+\varphi_2)]^2}, \tag{1}$$

и общей фазой суммарного колебания

$$\varphi = \arctan\left[\frac{[A_1\sin(w_1t+\varphi_1) + A_2\sin(w_2t+\varphi_2)}{A_1\cos(w_1t+\varphi_1) + A_2\cos(w_2t+\varphi_2)}\right], \tag{2}$$

где A_1 и A_2 — амплитуды суммируемых колебаний;

w_1, w_2 – соответствующие круговые частоты;

φ_1, φ_2 – частные фазовые сдвиги.

а

б

Рис. 1. Устройство для концентрации ультразвуковых колебаний:
а – разобранный концентратор; б – общий вид экспериментальной установки

Наложение двух колебаний повышает динамичность процесса деформирования металла. Суммарная амплитуда приводит к росту колебательной скорости УЗК, их интенсивности и звукового давления. Продольные волны УЗК вызывают также появление сдвиговых напряжений в материале. Согласно механизму суперпозиции напряжений, колебательное их значение с амплитудой τ_m и частотой ω вызывает периодическое изменение эффективного напряжения, определяющего скорость термоактивированного преодоления дислокациями барьеров с короткими радиусами действия

$$\tau^*_{\sim}(t) = \tau^2 + \tau_m\cos\varphi t, \tag{3}$$

где τ_m – эффективное напряжение в отсутствии акустических напряжений.

Действие концентрированного ультразвука приводит к появлению в деформируемых объемах повышенных температурных полей. Это влияет на изменение скоростей пластической деформации, интенсивность которых подчиняется уравнению Аррениуса

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_v exp\left[-\frac{H(\tau^*)}{kT}\right], \tag{4}$$

где $H(\tau^*)$ – энергия активации;

T – температура;

k — постоянная Больцмана;

$\dot{\varepsilon}_v$ – постоянная, зависящая от плотности дислокаций.

Акустические напряжения переменного характера и температурный фактор вызывают избыточный рост числа дислокаций и их интенсивные перемещения. Это приводит к проявлению в деформируемом металле акустопластического эффекта (АПЭ), т. е. эффекта повышения пластичности от действия УЗК. Эффект АПЭ проявляется в случае достижения амплитудой колебательных напряжений такого уровня, чтобы эффективные напряжения имели положительные значения и могли бы обеспечить рост скорости пластической деформации, достаточной для релаксации приложенного к материалу напряжения. С началом общего пластического течения величина АПЭ резко возрастает и быстро стремится к стационарной величине

$$\Delta\tau = \frac{kT}{V} ln\left[I_0(x)\left(\frac{V\tau_m}{rT}\right)\right], \tag{5}$$

где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;

V — активационный объем.

Эффективность действия концентрированного ультразвука можно оценить по изменению величины крутящих моментов при резьбонарезании метчиками или при вдавливании внутренней резьбы раскатниками или формирующим крепежом.

Для примера приведем результаты одной серии экспериментов по завинчиванию резьбовыдавливающих винтов в гладкие отверстия образцов из литого алюминиевого сплава АЛ9. Поскольку базовой продольной волной (наиболее длинной) является волна с меньшей частотой УЗК, на которую накладываются более короткие волны высокой частоты, то уровень упругих напряжений в материале образца, вызванных суммарной амплитудой A_x, будет определяться в виде выражения

$$\sigma_A = \pm EkA_x \cos(wt \pm kx), \tag{6}$$

где k — волновое число $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$;

λ — длина волны;

E — модуль упругости;

x — продольная координата.

Сложение статического напряжения с амплитудой знакопеременного напряжения в определенной части цикла делает суммарное напряжение достаточным для преодоления дислокациями потенциальных барьеров и, соответственно, для начала более раннего пластического течения.

В алюминиевых сплавах уровень данных напряжений может достигать величин 20–30 МПа и даже выше. Это значительно больше стартовых напряжений Пайерлса-Набарро для дислокаций, сдвигаемых относительно друг друга в кристаллической структуре решетки.

Таким образом, можно предположить, что уровень снижения крутящих моментов будет зависеть от физико-механических свойств материала и суммарной колебательной скорости УЗК. Если уровень крутящего момента резьбообразования в режиме обычного процесса обозначить как $M_{\text{кр}}$, а то же, но при воздействии УЗК — через $\widetilde{M}_{\text{кр}}$, то связь между этими величинами можно записать в виде

$$\widetilde{M}_{\text{кр}} = M_{\text{кр}} - \Delta M, \tag{7}$$

где ΔM – величина снижения крутящего момента от действия концентрированных УЗК

$\Delta M = f(A; V_k)$, а V_k – суммарная колебательная скорость ультразвука

$$V_k = Aw \cos wt. \tag{8}$$

Функции ΔM устанавливаются экспериментально для различных типов резьб и условий сборки или нарезания. Например, для резьбы $12 \bullet 1,5$, формируемой в отверстиях изделий из сплава АЛ9 резьбонакатывающими винтами, данные зависимости имеют форму, представленную на рис. 2.

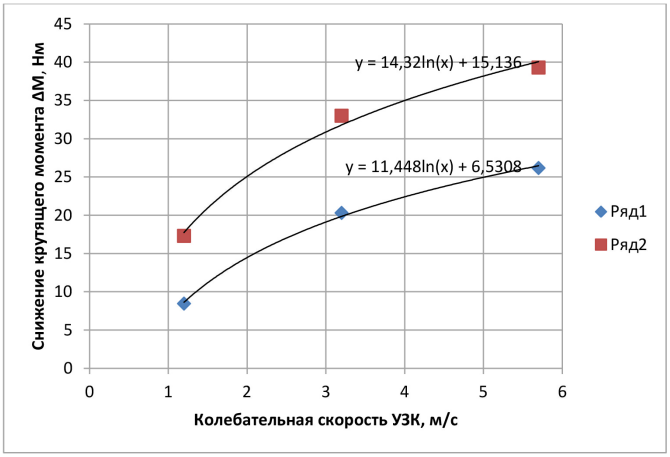

Рис. 2. Экспериментальные зависимости величины снижения крутящего момента для резьбы $12 \bullet 1,5$ в сплаве АЛ9: ряд1 —для обычных УЗК; ряд2 — для концентрированных УЗК

Каждая точка представленных зависимостей получена как среднее из 8 экспериментальных данных. Величина крутящего момента, относящегося к обычному резьбообразованию оценивается традиционной эмпирической зависимостью вида

$$M_{kp} = C_m \cdot d^x \cdot P^y \cdot v^z \cdot \delta^u \cdot k_{\text{см}} \cdot k_n, \tag{9}$$

где C_m – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала;

d, P – диаметр и шаг резьбы соответственно;

v – скорость завинчивания инструмента (винта, метчика и пр.);

δ – величина припуска под резьбу;

$k_{\text{см}}, k_n$ – коэффициенты, учитывающие влияние смазки и наличие покрытий на инструменте соответственно.

Таким образом, зная компоненты формулы (7), можно рассчитать крутящие моменты в режиме концентрированных УЗК.

Однако, остается вопрос о том, какую долю в общем объеме значений ΔM занимают базовая, т. е. низкочастотная компонента УЗК и, соответственно, высокочастотная.

Для этого были проведены серии экспериментов по выделению высокочастотной (ВЧ) составляющей ΔM. Производилась запись процесса, в ходе которой в точке, соответствующей 5-му витку, счетчик производил выключение генератора ВЧ УЗК. При этом серия из 25 экспериментов оценивала осциллограммы крутящих моментов с ВЧ компонентой, и такие же 25, при ее выключении. Обработка осциллограмм производилась с 5-го по 15-й витки. Для этого обе партии сортировались по парам. Устанавливалась разница в значениях крутящих моментов пар осциллограмм в той и другой группе. Значения записывались в журнал. Далее производилась пересортировка пар и снова измерялись разности в значениях моментов. Пересортировка производилась 4 раза с записью в тот же журнал. После этого вычислялись средние значения разностей по каждой указанной точке. Примерный вид осциллограмм приведен на рис. 3.

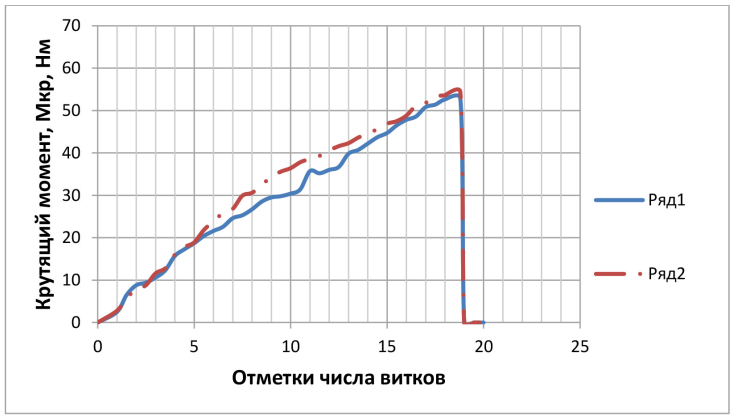

Рис. 3. Вид осциллограмм записи:
ряд1 – с ВЧ компонентой УЗК; ряд2 – при выключении ВЧ на 5-м витке

Средние значения разности моментов в парах свидетельствуют о наличии определенного влияния ВЧ УЗК на снижение крутящих моментов, хотя в общих полигонах рассеивания разностей наблюдались и отрицательные значения, особенно по начальным и конечным виткам. Далее серии экспериментов продолжились для оценки влияния скорости завинчивания на величины разностей моментов. Запись производилась при 3 фиксированных значениях скоростей: 0,037 м/с; 0,078 м/с; 0,12 м/с. В результате получены экспериментальные зависимости разностей в факторном пространстве «скорость – витки». Вид поверхности отклика этих зависимостей показан на рис. 4. Как видим, с ростом скорости влияние ВЧ УЗК становится менее значительным. Это объясняется тем, что влияние самой скорости становится преобладающим над влиянием этой компоненты. Кроме того, на начальных витках, когда составляющая трения в общей структуре момента минимальна, положительное влияние УЗК больше проявляется воздействием на деформационную составляющую от работы заходной части инструмента. С ростом крутящего момента растет и составляющая трения. При этом малая величина положительного влияния ВЧ колебаний в общем объеме момента становится менее заметной.

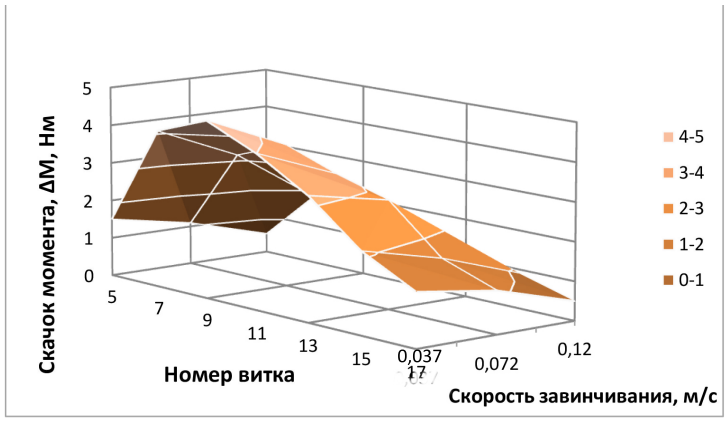

Рис. 4. Вид поверхности экспериментальных значений разностей моментов

Основным условием развития пластической деформации при воздействии концентрированных УЗК являются максимумы напряжений, возникающие при совпадении знака напряжений статической и динамической нагрузок (для линейного напряженного состояния). Заметны также пики напряжений, возникающие при геометрическом сложении максимальных сдвигающих напряжений от обоих источников при объемных напряженно-деформированных состояниях. Механизм воздействия ультразвуковых колебаний на контактное трение обусловлен изменением кинематики скольжения на контактной поверхности, характера взаимодействия контактируемых поверхностей и эффективности действия

смазок. Эффект оказывает и направление УЗК в зону контакта. Взаимодействие пульсирующих поверхностей сопровождается трением между микронеровностями, в результате чего выделяется тепло. Нагрев микровыступов приводит к уменьшению напряжений, необходимых для их смятия или сдвига. Степень повышения температуры микровыступов зависит от амплитуды смещений, частоты колебаний и шероховатости инструмента.

В случае резьбовыдавливания механизм действия ультразвука особенно актуален, т.к. от его понимания зависит эффективность процесса, а также правильность разработок оборудования и технологической оснастки. Исследовать действие ультразвука на процесс пластического течения металла возможно путем измерения микротвердости, и деформационной составляющей крутящего момента при завинчивании образцов, несущих только заходную часть, применением рентгеноструктурного и микроструктурного анализа.

Список литературы

1. Кобелев С. А., Вольсков Д. В. Снижение энергетических затрат на деформацию материалов путем ультразвукового воздействия // Современные технологии в машиностроении: IV Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: ПДЗ. 2001. Ч. 1. С. 88–89.

2. Нерубай М. С., Штриков Б. Л., Калашников В. В. Ультразвуковая механическая обработка и сборка. Самара: Самар. кн. изд-во, 1995. 190 с.

3. Малыгин Г. А. Акустопластический эффект и механизм суперпозиции напряжений // Физика твердого тела. 2000. Т. 42, вып. 1. С. 69–75.

4. Березин С. Я. Ультразвук в процессах резьбообразования и сборки. Чита: ЧитГУ, 2009. 167 с.

References

1. Kobelev S. A., Vol'skov D. V. Snizhenie energeticheskikh zatrat na deformatsiyu materialov putem ul'trazvukovogo vozdeistviya // Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii: IV Vseros. nauch.-prakt. konf. Penza: PDZ. 2001. Ch. 1. S. 88–89.

2. Nerubai M. S., Shtrikov B. L., Kalashnikov V. V. Ul'trazvukovaya mekhanicheskaya obrabotka i sborka. Samara: Samar. kn. izd-vo, 1995. 190 s.

3. Malygin G. A. Akustoplasticheskii effekt i mekhanizm superpozitsii napryazhenii // Fizika tverdogo tela. 2000. T. 42, vyp. 1. S. 69–75.

4. Berezin S. Ya. Ul'trazvuk v protsessakh rez'boobrazovaniya i sborki. Chita: ChitGU, 2009. 167 s.

Библиографическое описание статьи

Березин С. Я., Свиридов Ю. И. Активация внутреннего резьбообразования концентрированными потоками ультразвуковой акустической энергии // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2016. Т. 11, № 4. С. 91–98. DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-91-98.

Reference to article

Berezin S. Ya., Sviridov Yu. I. Activation of Internal Thread-Formation by Concentrated Streams of Ultrasonic Acoustic Energy // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2016. Vol. 11, No 4. P. 91–98.
DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-91-98.

Статья поступила в редакцию 04.05.2016