

УДК 621.789

Теоретическое обоснование области режимных параметров ультразвукового деформирования для обеспечения чистового и упрочняющего эффектов в обработке металлических материалов

Х.М. Рахимьянов^a, К.Х. Рахимьянов^b, Ю.С. Семенова^c, А.С. Еремина^d

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, Новосибирск, Россия

^akharis51@mail.ru, ^bbacktof79@mail.ru, ^cnahat@yandex.ru, ^da.eremina@corp.nstu.ru

Статья поступила 30.09.2015, принята 20.10.2015

Решение вопросов назначения режимных параметров электрофизических методов обработки материалов для достижения требуемых эффектов значительно облегчается при использовании математического моделирования процессов, имеющих место в обработке. В статье предлагается теоретическое обоснование режимных параметров ультразвукового пластического деформирования металлических материалов с различной исходной твердостью для обеспечения определенной морфологии поверхности и достижения упрочняющего эффекта. Теоретический подход основан на решении волнового уравнения движения ультразвуковой колебательной системы. Это позволило получить функциональные зависимости от режимных параметров процесса таких характеристик, как диаметр пластического отпечатка ($d_{оп}$) и глубина наклепа (h_n). Последние следует рассматривать как оценку реакции материала на деформационное воздействие. Анализ результатов математического моделирования позволил установить область режимных параметров ультразвукового деформирования (диаметра деформирующего элемента, амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний, статического усилия прижима инструмента к детали) с выявлением границ перехода от упругих деформаций к пластическим с одной стороны и реализации ультразвукового деформирования как дробного нагружения на материал с другой стороны. Показано, что расчет диаметра пластического отпечатка в установленной области режимных параметров позволяет получить количественную оценку отделочного и упрочняющего эффектов в обработке с использованием математических моделей формирования микрогеометрии и расчета напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации. Основные выводы и рекомендации, представленные в работе, необходимы для разработки финишных операций при обработке поверхностей, к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования (ударная и усталостная прочность, износостойкость, долговечность и другие).

Ключевые слова: ультразвуковое деформирование; математическая модель; диаметр пластического отпечатка; колебательная система; упрочняюще-отделочная обработка; глубина наклепа.

Theoretical justification for the range of operating parameters of ultrasonic deformation for ensuring finishing and hardening effects in processing metallic materials

Kh.M. Rakhimyanov^a, K.Kh. Rakhimyanov^b, Yu.S. Semyonova^c, A.S. Eryomina^d

Novosibirsk State Technical University; 20, K. Marks ave., Novosibirsk, Russia

^akharis51@mail.ru, ^bbacktof79@mail.ru, ^cnahat@yandex.ru, ^da.eremina@corp.nstu.ru

Received 30.09.2015, accepted 20.10.2015

The problem solving of destination the operating parameters of the electrophysical methods of processing materials to achieve the desired effects is much easier when using the mathematical modeling of processes taking place in the processing. The article offers a theoretical justification for operating parameters of the ultrasonic plastic deformation of metallic materials with different initial hardness to provide a specific surface morphology and achieve hardening effect. The theoretical approach is based on the solution of the wave equation of the ultrasonic vibrating system motion. It allows obtaining functional dependencies of such parameters as the diameter of the plastic imprint (d_{op}) and hardening depth (h_n) on the operating mode. These parameters should be regarded as the reaction of the material on deformation. Analysis of the mathematical modeling results allows establishing the operating parameters range of the ultrasonic deformation (the diameter of the deforming element, the amplitude and frequency of the ultrasonic vibration, static load of the tool to the workpiece) with the identification of the boundaries of the transformation from elastic to plastic deformation, on the one hand, and the implementation of the ultrasonic deformation as a fractional load on the material on the other hand. It is shown that the calculation of the diameter of the plastic imprint in the established range of operating parameters allows quantifying the finishing and hardening effects in processing with the use of mathematical models of microgeometry formation and calculation of the stress-strain state of the material in the deformation zone. The main conclusions and recommendations presented in the work are necessary for the development of the finishing operations in the processing of surfaces, which needs to be increased in the performance requirements (impact and fatigue strength, wear resistance, durability, etc.).

Key words: ultrasonic deformation; mathematical model; diameter of the plastic imprint; vibrating system; finishing and hardening processing; hardening depth.

Введение. Разработка и внедрение в производство энерго- и ресурсосберегающих технологий направлено на повышение его эффективности как с позиций снижения трудоемкости, так и обеспечения качества машиностроительной продукции. Особый интерес представляют методы физико-технической обработки металлов и сплавов. Это относится как к размерной обработке с использованием источников с высокой концентрацией энергии (лазерное излучение, плазменная дуга, электронный луч) [1–3], так и к упрочняющей обработке на базе импульсных источников деформирования (гидродробеструйное упрочнение, чеканка, ультразвуковое деформирование) [4–6]. Особое место занимают комбинированные методы, основанные на сочетании различных по своей природе физических процессов [7]. В технологии упрочняющих методов обработки определенный интерес представляет поверхностное пластическое деформирование металлов и сплавов индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой [6; 8]. Высокая концентрация энергии, локальность и кратковременность ультразвукового воздействия определяют специфику процессов, реализуемых в зоне обработки [9–11]. Этим объясняется достижение высоких эксплуатационных показателей изделий после ультразвукового пластического деформирования [12–16]. Таким образом, становится очевидной роль теоретических исследований, направленных на описание реализуемых в обработке воздействий и процессов, связанных с реакцией на них обрабатываемого материала [6; 17].

Ультразвуковое воздействие представляет собой дробное в силовом отношении деформирование материала поверхностного слоя деталей машин и инструментов, направленное на достижение как упрочняющего, так и отделочного (чистового) эффектов.

Достижение необходимого комплекса показателей упрочняющего и отделочного эффектов в обработке невозможно без теоретического исследования процессов, реализуемых в зоне деформации, и их математического описания.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию области режимных параметров ультразвукового пластического деформирования металлических материалов, ответственных за формирование показателей упрочняющего и отделочного эффектов в обработке.

Теория. Математическое описание ультразвуковой колебательной системы в виде волнового уравнения дано авторами монографии [18], а его решение представлено в работе [19], в которой дано математическое описание процесса ультразвукового деформирования. В результате расчетов определены области режимных параметров деформирования, позволяющие рассматривать обработку как дробное воздействие индентора на обрабатываемую поверхность с наличием фаз их контактирования и отрыва. Дана количественная оценка таких параметров процесса, как время контактирования индентора с обрабатываемым материалом, положение фазы контактирования в периоде ультразвуковых колебаний, значение действующих усилий на всех этапах деформационного нагружения. Установленное по результатам расчетов значительное (до 3,5 раз) превышение действующего усилия над статическим, прикладываемым к колебательной системе, теоретически подтверждает эффективность использования данного вида поверхностного пластического деформирования для

обработки тонкостенных деталей, деталей малой жесткости, изделий с покрытиями [20].

Однако вопрос количественной оценки процессов, связанных с реакцией обрабатываемого материала на ультразвуковое воздействие и ответственных за достижение упрочняющего и отделочного эффектов в обработке, остается нерешенным.

Результаты и обсуждение. Для изучения процессов в очаге деформации при ультразвуковом воздействии целесообразно воспользоваться предложением В.С. Смирнова о решении прикладных задач обработки металлов давлением с использованием дислокационной теории [21]. Внедрение шара в обрабатываемый материал автор рассматривает как схему деформирования с переходом от искусственной ситуации внедрения индентора в тонкую пластину (толщина которой меньше глубины внедрения) к реальным размерам деформируемой области. Сферическая поверхность индентора (шара) схематизируется совокупностью бесконечно большого числа полых цилиндров (за исключением центрального сплошного), вставленных друг в друга беззазорно, со смещением по высоте на величину, равную вектору Бюргерса. Используя дислокационную теорию, автор получил уравнение работы при внедрении шара в тонкую пластину. Дальнейшее развитие задачи, связанное с переходом к реальной ситуации деформирования полупространства и введением отражающих данный переход уточнений, позволило автору получить выражение для работы внешних сил в виде:

$$W = 2.57n_d^3 \omega_A \tau_n \varepsilon_D^4 D_C, \quad (1)$$

где n_d — коэффициент пропорциональности, определяемый отношением диаметров пластически деформированной зоны около лунки и отпечатка ($n_d = 3,0$ для многократного деформирования) [5]; ω_A — коэффициент пропорциональности, учитывающий реальные условия обработки ($\omega_A = 5,18$ при деформировании среднеуглеродистой стали шаром диаметром 4-10 мм на скоростях деформирования, близких к ультразвуковым [4]); τ_n — минимальные касательные напряжения, необходимые для движения дислокаций ($\tau_n = 10^{-4}G$, G — модуль сдвига); ε_D — коэффициент, определяемый отношением $d_{отп}/D_C$; $d_{отп}$ — диаметр пластического отпечатка; D_C — диаметр сферы индентора (шара).

Для определения диаметра пластического отпечатка необходимо воспользоваться одним из решений волнового уравнения движения ультразвуковой колебательной системы [8], устанавливающим связь глубины внедрения индентора в обрабатываемую поверхность с параметрами колебательной системы в виде:

$$h(t) = A_{max} [\sin(\omega t + \varphi_1) - e^{-q\omega t} \sin \varphi_1], \quad (2)$$

где A_{max} — амплитуда ультразвуковых колебаний; ω — круговая частота колебаний; $q = \pi HB \cdot D_C / \omega \rho c S$; HB — твердость обрабатываемого материала; ρ — плотность материала ультразвукового волновода; c — скорость распространения продольных звуковых волн в волноводе; S — площадь поперечного сечения волновода; $\varphi_1 = \varphi_0 + \arctg q$; φ_0 — угол траектории колебаний ультразвукового волновода, соответствующий началу контактирования индентора с обрабатываемой поверхностью.

Максимальная глубина внедрения (h_{max}) индентора в материал соответствует моменту времени t_1 , значение которого определяется решением уравнения:

$$(3)$$

Тогда значение диаметра пластического отпечатка определяется как:

$$(4)$$

Анализ уравнения (1) указывает на зависимость работы внешних сил от практически всех факторов, влияющих на процесс пластического деформирования материала. В.В. Петросовым [4] данное уравнение применялось для определения глубины наклепа при гидродробеструйной обработке. В качестве работы оценивалась кинетическая энергия шара. Представленное уравнение может быть использовано для расчета работы внешних сил при ультразвуковом деформировании. В этом случае левая часть уравнения (1) с учетом выражения для действующего усилия при ультразвуковом деформировании [19]:

$$F_0(t) = \pi HB k \cdot D_c \cdot h(t) \cdot K_c \quad (5)$$

принимает вид:

где $F_0(t)$ — действующее усилие при ультразвуковом нагружении; HB — твердость обрабатываемого материала; k — коэффициент пропорциональности между значением динамической твердости и твердости обрабатываемого материала ($k = 1.75$ [5], $k = 1.5 \div 2.25$ [22]); $h(t)$ — глубина внедрения индентора в обрабатываемую поверхность; K_c — коэффициент перекрытия пластических отпечатков при сообщении системе кинематических движений (скорости и подачи).

Приравняв правые части уравнений (5) и (1), получим:

$$(6)$$

Воспользовавшись определением $\epsilon_d = d_{отп}/D_c$ и принимая во внимание выражение, устанавливающее соотношение глубины наклепа и диаметра пластического отпечатка в виде [5]:

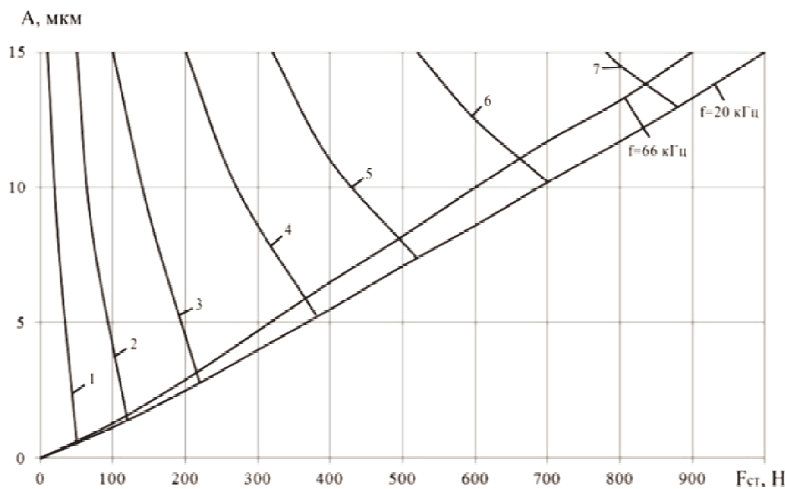


Рис. 1. Область параметров ультразвукового деформирования для формирования пластического отпечатка диаметром до 0,85 мм (сталь $HB_{нск} = 2700$ МПа, $D_c = 8$ мм): 1 — $d_{отп} = 0,25$ мм; 2 — $d_{отп} = 0,35$ мм; 3 — $d_{отп} = 0,45$ мм; 4 — $d_{отп} = 0,55$ мм; 5 — $d_{отп} = 0,65$ мм; 6 — $d_{отп} = 0,75$ мм; 7 — $d_{отп} = 0,85$ мм

получим уравнение, связывающее работу действующих сил при ультразвуковом деформировании и глубину наклепа :

$$(7)$$

После соответствующих преобразований зависимость глубины наклепа от режимов деформационного нагружения и свойств обрабатываемого материала выглядит следующим образом:

$$(8)$$

Совокупность полученных на основе решения волнового уравнения соотношений может рассматриваться как деформационная модель упрочняюще-отделочной ультразвуковой обработки.

Расчет деформационной модели позволяет не только установить взаимосвязь кинематических и динамических параметров ультразвукового воздействия, но и количественно оценить реакцию материала на деформационное воздействие. Следует отметить, что количественной мерой такой реакции служат значения диаметра пластического отпечатка и глубины наклепа. Наложение отпечатков друг на друга при сообщении колебательной системе кинематических движений (скорости и подачи) будет определять достижение определенного упрочняющего и отделочного эффектов в обработке. На рис. 1 показана область режимов ультразвукового деформирования (A , $F_{ст}$, f), обеспечивающих образование отпечатков определенных размеров для сферического деформатора. Верхней границей области служит ограничение максимального значения амплитуды, а нижней — частоты ультразвуковых колебаний. Рассчитав требуемое значение $d_{отп}$ для формирования определенной микрогеометрии, используя данные (рис. 1), представляется возможным установление необходимых режимов обработки согласно модели, представленной в работе [23].

Изменение величины отпечатка от статического усилия при использовании различных значений диаметра сферы индентора показано на рис. 2. Расчеты деформационной задачи позволили установить это же соотношение для обработки материалов различной исходной твердости (рис. 3).

Если размер отпечатка является одним из параметров зоны деформирования, то глубина деформирования

— вторым (высотным). Их различное соотношение для обработки может быть обеспечено задействованием в обработке инденторов с разными значениями диаметров сфер (рис. 4).

Зависимость глубины проникновения пластической деформации (наклепа) от технологических режимов ультразвуковой обработки и твердости обрабатываемого материала представлена на рис. 5 и 6.

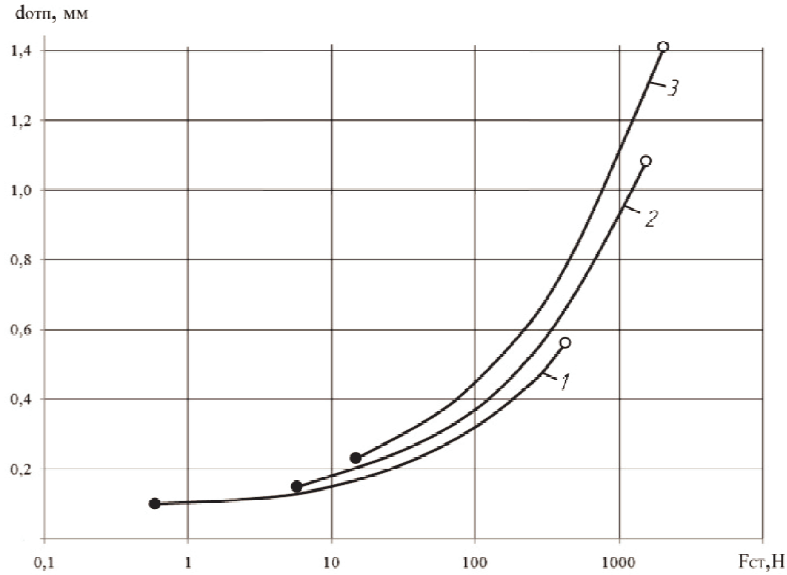


Рис. 2. Зависимость диаметра пластического отпечатка от статического усилия ультразвукового нагружения и диаметра индентора (сталь $HB_{исх} = 2700$ МПа, $f = 20$ кГц): • — граница перехода от упругой деформации к пластической; ° — граница, определяемая $A_{max} = 10$ мкм

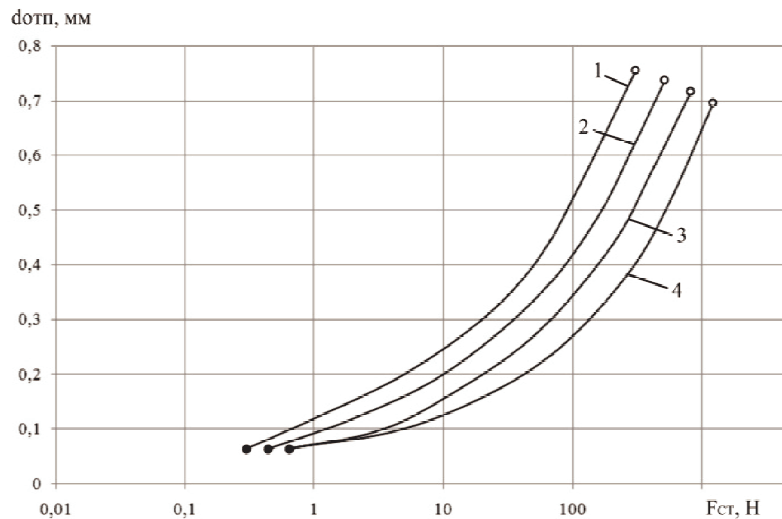


Рис. 3. Зависимость диаметра пластического отпечатка от статического усилия при ультразвуковом деформировании сталей различной твердости ($f = 20$ кГц, $D_c = 8$ мм): 1 — $HB = 450$ МПа; 2 — $HB = 800$ МПа; 3 — $HB = 2200$ МПа; 4 — $HB = 6000$ МПа; • — граница перехода от упругой деформации к пластической; ° — граница, определяемая $A_{max} = 10$ мкм

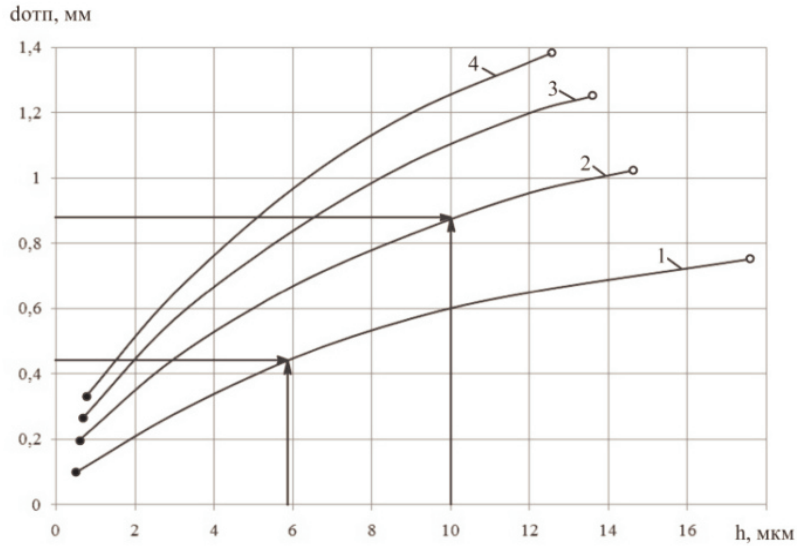


Рис. 4. Влияние диаметра сферы индентора на соотношение параметров деформированной зоны от ультразвукового воздействия (сталь $HV_{исх} = 2700$ МПа, $f = 20$ кГц): 1 — $D_c = 8$ мм; 2 — $D_c = 20$ мм; 3 — $D_c = 30$ мм; 4 — $D_c = 40$ мм; • — граница перехода от упругой деформации к пластической; ° — граница, определяемая $A_{max} = 10$ мкм

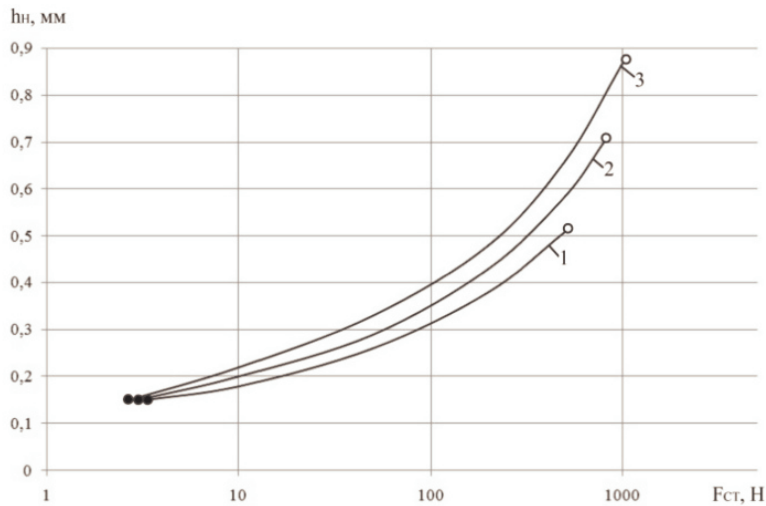


Рис. 5. Зависимость глубины деформационного упрочнения от режимов ультразвукового воздействия (сталь $HV_{исх} = 2700$ МПа, $D_c = 8$ мм, $f = 20$ кГц): 1 — $A = 5$ мкм; 2 — $A = 10$ мкм; 3 — $A = 15$ мкм; • — граница перехода от упругой деформации к пластической; ° — граница, определяемая $A_{max} = 10$ мкм

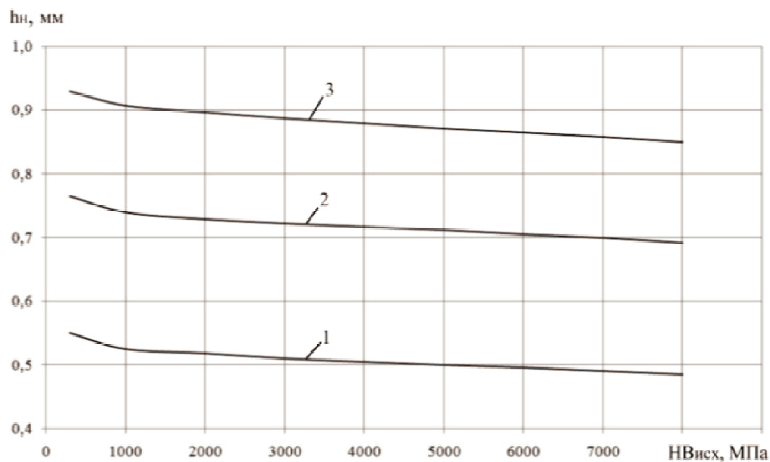


Рис. 6. Предельно допустимые значения глубины деформационного упрочнения сталей с различной исходной твердостью ($D_c = 8$ мм, $f = 20$ кГц): 1 — $A = 5$ мкм; 2 — $A = 10$ мкм; 3 — $A = 15$ мкм

Возможность количественной оценки диаметра пластического отпечатка и глубины наклепа позволяет получить геометрическое описание очага деформации при ультразвуковом пластическом деформировании. При использовании результатов математического моделирования, полученных в работе [24], представляется возможным оценить напряженно-деформированное состояние материала в очаге деформации, определяющее упрочняющий эффект.

Моделирование деформационного процесса позволит получить количественные взаимосвязи параметров зоны деформирования с режимами высокоскоростного нагружения, а через обобщающий параметр d_{omn} установить соотношение кинематических и деформационных составляющих ультразвуковой обработки для удовлетворения требований к формируемому поверхностному слою по микрогеометрическим и прочностным характеристикам.

Заключение

1. Расчет математической модели ультразвукового пластического деформирования материалов различной исходной твердости позволил провести количественную оценку не только параметров деформационного нагружения (времени контактирования, фаз внедрения и выхода индентора в периоде ультразвуковых колебаний, действующих усилий на всех этапах деформирования), но и определить реакцию обрабатываемого материала на деформационное воздействие по значению диаметра пластического отпечатка и глубины наклепа.

2. Полученные математические зависимости диаметра пластического отпечатка и глубины наклепа от режимных параметров ультразвукового деформирования материалов различной исходной твердости дают возможность определить их граничные значения, с одной стороны отделяющие области упругих и пластических деформаций, а с другой стороны позволяющие рассматривать ультразвуковое деформирование как дробное нагружение с наличием фаз внедрения и отрыва индентора от обрабатываемой поверхности.

3. Количественная оценка диаметра пластического отпечатка в зависимости от режимных параметров ультразвукового деформирования позволяет на базе математической модели формирования микрогеометрии управлять морфологией обрабатываемой поверхности, определяющей отделочный эффект в обработке.

4. В то же время диаметр пластического отпечатка характеризует геометрию очага деформации, что делает возможной оценку напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации. Таким образом, изменение диаметра пластического отпечатка в совокупности с глубиной наклепа позволяет управлять упрочняющим эффектом в ультразвуковом пластическом деформировании материалов.

Литература

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение. 1989. 304 с.
2. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов: М.: Академия. 2005. 336 с.
3. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение. 1978. 239 с.

4. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение. 1977. 166 с.
5. Кудрявцев И.В. Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа. М.: Машиностроение, 1965. Кн. 108. С. 6-34.
6. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2007. 404 с.
7. Иванцовский В.В., Рахимьянов Х.М. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и финишной механической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 6. С. 43-46.
8. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / отв. ред. М.Ф. Жуков, В.М. Фомин. Новосибирск, 2000. Т.18. 425 с.
9. Rusinko A. Ultrasound and irrecoverable deformation in metals. Modeling of plastic and creep deformation. Lambert Academic Publishing, 2012. 168 p.
10. Berezina A.L., Monastyrskaya T.O., Prokopenko G.I., Molebny O.A., Polishchuk S.S., Kotko A.V. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on the Structure and Properties of Al-Mg-Si Alloy // Proceedings of the international conference "Nanomaterials: applications and properties". 2013. Vol. 2, № 1. 2013.
11. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for surface properties management // Journal of Sound and Vibration. 2007. Vol. 308, № 5. P. 855-866.
12. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Prokopenko G., Mikheev P., Knysh V. Optimum Application of Ultrasonic Peening // SEM Annual Conference and Exposition: Experimental Mechanics in Emerging Technologies. Portland, Oregon, USA, 2001. June 4-6. P. 179-182.
13. Roy S., Fisher J., Yen B. Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT) // International Journal of Fatigue. 2003. Vol. 25. P. 1239-1248.
14. Huo L., Wang D., Zhang Y., Chen J. Investigation on Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Ultrasonic Peening Method // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications. Switzerland, 2000. Vol. 183-187. P. 1315-1320.
15. Klimenov V.A., Kovalevskaya Zh.G., Nekhoroshkov O.N., Uvarkin P.V., Tolstov V.P. Increasing the life-time of wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surfaces // Proceedings of the 14th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2005, Czech Republic, Hradec nad Moravici, Ostrava, May 24-26. 2005. P. 214-221.
16. Krishna K., Verma P.E., Statnikov E.S., Theini L. Improving service life of steel bridges, light poles and sign structures through the use of ultrasonic impact treatment (UIT) // Proceedings of the Second International Conference "Bridge Maintenance, Safety, Management and Costs", Watanabe, Frangopol & Utsunomiya (eds.), Taylor & Francis Group., London, 2004.
17. Рахимьянов Х.М. Теоретические основы комбинирования высокоинтенсивных термических и деформационных процессов в поверхностной обработке: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тула, 1998. 40 с.
18. Абрамов О.В., Добаткин В.И., Казанцев В.Ф. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986. 278 с.
19. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Eremina A.S. Modeling of Deformation Processes for Conditions of Ultrasonic Frequency Impulse Impact on the Surface Layer of Metals and Alloys // Trans Tech Publications. Switzerland. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 788. P. 63-68.
20. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Третьяков М.А. Повышение качества поверхностного слоя деталей с покрытиями малой толщины из нанокристаллических порошков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 3. С. 18-22.

21. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 466 с.
22. Дрозд М.С. Глубина наклепанного слоя при дробеструйной обработке деталей // Вестн. машиностроения. 1955. № 5. С. 48-50.
23. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010 № 2. С. 3-10.
24. Рахимьянов Х.М., Никитин Ю.В., Исупов А.В. Прогнозирование состояния материала в очаге деформации при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 4. С. 41-46.

References

1. Grigor'yants A.G. Fundamentals of laser processing of materials. M.: Mashinostroenie. 1989. 304 p.
2. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. Flame machining of metals. M.: Akademiya. 2005. 336 p.
3. Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A. Fundamentals of electron beam processing of materials. M.: Mashinostroenie. 1978. 239 p.
4. Petrosov V.V. Hydro - shot peening of machine parts and tools. M.: Mashinostroenie. 1977. 166 p.
5. Kudryavtsev I.V. Increased durability of machine parts by surface hardening. M.: Mashinostroenie, 1965. Kn. 108. P. 6-34.
6. The technological processes of surface plastic deformation / pod red. S.A. Zaidesa. Irkutsk: Izd-vo IrGTU. 2007. 404 p.
7. Ivantsivskii V.V., Rakhimyanov Kh.M. Technological maintenance of the surface layer quality of machine parts during integrating thermal machining and finishing // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2005. № 6. P. 43-46.
8. High energy processes of materials treating / otv. red. M.F. Zhukov, V.M. Fomin. Novosibirsk, 2000. T. 18. 425 p.
9. Rusinko A. Ultrasound and irrecoverable deformation in metals. Modeling of plastic and creep deformation. Lambert Academic Publishing, 2012. 168 p.
10. Berezina A.L., Monastyrskaya T.O., Prokopenko G.I., Molebny O.A., Polishchuk S.S., Kotko A.V. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on the Structure and Properties of Al-Mg-Si Alloy // Proceedings of the international conference "Nanomaterials: applications and properties". 2013. Vol. 2, № 1. 2013.
11. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for surface properties management // Journal of Sound and Vibration. 2007. Vol. 308, № 5. P. 855-866.
12. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Prokopenko G., Mikheev P., Knysh V. Optimum Application of Ultrasonic Peening // SEM Annual Conference and Exposition: Experimental Mechanics in

- Emerging Technologies. Portland. Oregon. USA, 2001. June 4-6. P. 179-182.
13. Roy S., Fisher J., Yen B. Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT) // International Journal of Fatigue. 2003. Vol. 25. P. 1239-1248.
14. Huo L., Wang D., Zhang Y., Chen J. Investigation on Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Ultrasonic Peening Method // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications. Switzerland, 2000. Vol. 183-187. P. 1315-1320.
15. Klimenov V.A., Kovalevskaya Zh.G., Nekhoroshkov O.N., Uvarkin P.V., Tolstov V.P. Increasing the life-time of wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surfaces // Proceedings of the 14th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2005, Czech Republic, Hradec nad Moravici, Ostrava, May 24-26. 2005. P. 214-221.
16. Krishna K., Verma P.E., Statnikov E.S., Theini L. Improving service life of steel bridges, light poles and sign structures through the use of ultrasonic impact treatment (UIT) // Proceedings of the Second International Conference "Bridge Maintenance, Safety, Management and Costs", Watanabe, Frangopol & Utsunomiya (eds.), Taylor & Francis Group., London, 2004.
17. Rakhimyanov Kh.M. Theoretical basis of the combination of high thermal and deformation processes in surface processing: avtoref. dis. ... d-ra. tekhn. nauk. Tula, 1998. 40 p.
18. Abramov O.V., Dobatkin V.I., Kazantsev V.F. Effects of high-intensity ultrasound at the interface metal. M.: Nauka, 1986. 278 p.
19. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Eremina A.S. Modeling of Deformation Processes for Conditions of Ultrasonic Frequency Impulse Impact on the Surface Layer of Metals and Alloys // Trans Tech Publications, Switzerland. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 788. P. 63-68.
20. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Tret'yakov M.A. Surface layer refinement of details with small coating thickness made of nanocrystalline powder by ultrasonic surface plastic deformation // METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE. 2011. № 3. P. 18-22.
21. Smirnov V.S. Theory of Metal Forming. M.: Metallurgiya, 1973. 466 p.
22. Drozd M.S. The depth of the cold-hardened layer by shot blasting parts // Russian Engineering Research. 1955. № 5. P. 48-50.
23. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S. Modeling of the regular microrelief formation at ultrasonic plastic deformation // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2010. № 2. P. 3-10.
24. Rakhimyanov Kh.M., Nikitin Yu.V., Isupov A.V. Prediction of the material state in the deformation zone at ultrasonic surface plastic deformation // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2005. № 4. P. 41-46.