

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОЩАДКИ КОНТАКТА ПРИ УПРОЧНЕНИИ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Кокорева О.Г.

*Московская государственная академия водного транспорта – филиал
Государственного университета морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова, г.Москва*

Ключевые слова: долговечность, эксплуатационные свойства, поверхностная пластическая деформация, упрочнение, площадка контакта, моделирование, индентор, технологический процесс.

Аннотация. Рассмотрены технологические особенности упрочнения поверхностей деталей при поверхностной пластической деформации (ППД). Отмечены преимущества обработки поверхностей методами ППД. Разработана математическая модель взаимодействия индентора и обрабатываемой поверхности. Разработаны методы аналитического прогнозирования параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных методами ППД.

Решением одной из основных задач технологического проектирования является создание комплекса моделей технологического процесса, позволяющих прогнозировать ожидаемые параметры упрочнения: степень деформации, глубину упрочненного слоя, шероховатость обработанной поверхности. В процессе внедрения индентора в поверхностный слой детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина, вокруг которой остается отличающееся от сердцевины детали пластически деформированное пространство глубиной h_n . Прогнозирование параметров упрочнения (глубины упрочненного слоя и степени деформации), учитывающее технологические режимы обработки и физико-химические свойства материала детали, представляет собой сложную научную задачу. Приведенные в литературе теоретические зависимости основываются на теории упругости или пластичности со значительными упрощениями и допущениями [1,2].

При моделировании взаимодействия сферического индентора с плоской поверхностью получена обобщающая зависимость. Данная модель описывает влияние размеров площади контакта сферы с плоскостью на глубину упрочненного слоя h_n [4]:

$$h_n = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T} - 0,5 \left(\frac{d}{2}\right)^2},$$

где P – контактная нагрузка, σ_T – предел текучести материала детали, d – диаметр контактной площадки индентора с деталью.

В работе [5] представлена уточненная и пригодная для прогнозирования результатов обработки зависимость, учитывающая, что в большинстве случаев площадь контакта сферического индентора с плоскостью является эллипсной:

$$h_n = K \cdot \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T} - 1.42 \cdot a \cdot b}.$$

Здесь K — коэффициент, который учитывает влияние формы пятна контакта, a и b — полуоси эллипса контакта:

$$b = \sqrt{R_{ш}^2 - (R_{ш} - h_{max})^2}, a = \frac{\pi}{2} \cdot (ctg \alpha - f) \cdot h_{max} + b,$$

где h_{max} — максимальная глубина внедрения индентора; $R_{ш}$ — радиус индентора; α — угол встречи индентора с поверхностью детали; f — коэффициент трения скольжения индентора по материалу обрабатываемой детали. Применение представленных ранее зависимостей, позволяющих определить глубину проникновения пластической деформации h_n , требует знания таких величин, как контактная нагрузка P и предел текучести материала детали. Однако в некоторых случаях, в особенности при динамических методах обработки, определение P и σ_T представляет значительные трудности, поэтому определение величины h_n желательно осуществлять через параметры, которые легко вычислить или определить из опытов. В работе [4] выражение (3) преобразовано:

$$h_n = 2,5 \cdot K \cdot \sqrt{D_{ш} \cdot h_{max}}, \text{ где } D_{ш} \text{ — диаметр индентора.}$$

В работе [4] представлена зависимость для определения коэффициента, учитывающего влияние формы пятна контакта:

$$K = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{b}{a}\right)^4.$$

Тогда с учетом (5) и (6) зависимость для определения глубины упрочненного слоя h_n принимает вид:

$$h_n = 3,8 \cdot R_{ш} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{b}{a}\right)^4\right] \cdot \sqrt{V_{эф} \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{ш}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}$$

где $V_{эф}$ — эффективная скорость обработки; m — плотность материала индентора; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности. Степень деформации ε — условно принимаемое отношение диаметра остающейся от давливания лунки d к диаметру вдавливаемой сферы D

$$\varepsilon = \frac{d}{D}.$$

Пользуясь результатами исследований, представленными в работе [5], диаметр остающейся после внедрения индентора в деформированное полупространство лунки d можно записать:

$$d = \left(\frac{D \cdot E_y}{0,1 \cdot HD}\right)^{\frac{1}{4}},$$

где E_y — энергия удара индентора, HD — динамическая твердость материала.

Для динамических методов ППД:

$$E_y = \left(\frac{m_{ш} \cdot V_{эф}^2}{2}\right), \text{ где } m_{ш} \text{ — масса индентора.}$$

Учитывая, что $HB = 0,2 \cdot HD^{0,89}$ [4], после преобразований получим следующую зависимость для динамических методов ППД:

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{V_{эф}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ш}}{HB^{1,12}}},$$

где HB — твердость материала детали по Бринеллю.

При обработке динамическими методами ППД помимо упрочнения происходит изменение шероховатости поверхности детали от исходных значений до некоторой величины. Она определяется режимами обработки, характеристиками оборудования и инструмента, в дальнейшем сохраняется и называется установившейся. Параметры такой шероховатости формируются при случайном пересечении профилей отпечатков инструмента на поверхности детали. При значительном увеличении времени обработки возникает угроза появления полидеформационных разрушений. Ранее в результате многочисленных теоретических и экспериментальных исследований были получены зависимости для определения установившейся шероховатости [3]:

$$R_{\text{уст}} = 0,006 \cdot k_3 \cdot \sqrt{\frac{h_{\text{max}} \cdot a \cdot b \cdot l_{\text{ед}}}{R^2}},$$

где $l_{\text{ед}}$ — единичная длина; k_3 — коэффициент загрузки рабочей камеры.

На основании представленных зависимостей разработана методика аналитического прогнозирования параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных динамическими методами ППД. Данные зависимости получили экспериментальную проверку и могут применяться для проектирования высокоэффективных, экономичных технологических процессов (ТП) обработки динамическими методами ППД.

Оптимизация ТП обработки зависит от выбора технических ограничений, определяющих область существования оптимальных решений. Необходимо как можно точнее формулировать ограничения, которые вытекают из производственных условий. В этом случае остается меньшее количество вариантов процесса, рассматриваемого в качестве основы для выбора оптимального решения. Оптимальным режимом ППД, проводимого с целью упрочнения деталей, испытывающих циклические нагрузки, является тот, который позволит обеспечить максимальное приращение предела выносливости детали по сравнению с его исходным значением. В общем случае для материала детали с определенным набором физико-механических свойств величина предела выносливости зависит от таких факторов, как:

- величина и распределения остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое детали после ППД; глубина упрочненного слоя;
- физическое состояние пластически деформированного слоя детали.

Зависимости для определения глубины упрочненного слоя не позволяют выявить оптимальное физическое состояние поверхностного слоя. Это состояние формируется в процессе обработки детали и определяется конкурирующим влиянием двух протекающих параллельно процессов: физического упрочнения (наклепа) с одной стороны, разрушения — с другой.

По мере увеличения интенсивности деформации происходит непрерывный рост предела текучести материала детали за счет наклепа. Наибольшие остаточные напряжения сжатия близки к возрастающему пределу текучести.

Для усиления благоприятных факторов нужно стремиться к максимальной интенсивности деформации поверхностного слоя. Однако при такой интенсивности увеличивается вероятность одновременного разупрочнения поверхностного слоя, поэтому необходимо обеспечить оптимальную величину

интенсивности деформации, при которой приращение предела выносливости детали будет наибольшим. Очевидно, она должна быть больше интенсивности деформации на предел текучести ε_T и меньше интенсивности деформации непосредственно перед разрушением $\varepsilon_{\text{разр}}$. Учитывая результаты работы [5], при описании деформационного упрочнения можно считать, что главная часть ресурса пластичности исчерпывается на стадии равномерной деформации $\varepsilon_i > \varepsilon_p$ а за ее пределами (т. е. при $\varepsilon_i > \varepsilon_p$) наблюдается значительный рост количества и размера микродефектов. Из вышесказанного следует, что при $\varepsilon_i = \varepsilon_p$ упрочнение материала близко к предельному, величина сжимающих остаточных напряжений приближается к максимальной, а появление дефектов (микротрещин) не достигает опасной интенсивности. Таким образом, оптимальной интенсивностью деформации должна быть $\varepsilon_i > \varepsilon_p$.

Приближенные, но достаточно точные значения предельной равномерной деформации ε_i можно определять по следующей зависимости:

$$\varepsilon_p = \frac{245}{HD}, \text{ где } HD \text{ — динамическая твердость материала.}$$

Для круглого отпечатка интенсивность деформации можно определить по зависимости:

$$\varepsilon_p = 2,4 \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^{\frac{2}{3}}, \text{ где } h \text{ — глубина остаточной вмятины.}$$

Следует отметить, что в исследованиях, проводимых ранее, оптимизация технологических процессов осуществлялась по критерию трудоемкости [5]. Для упрочняющих методов ППД целесообразнее проводить оптимизацию по критерию усталостной долговечности, которая непосредственно влияет на увеличение долговечности детали.

Таким образом, для оптимизации технологических процессов обработки динамическими методами ППД в качестве целевой функции выбрана интенсивность деформации, то есть из всего множества проектных решений выделяется такое, которое обеспечивает при определенном сочетании технологических факторов величину интенсивности деформации, наиболее близкую к равновесной. В качестве исходных данных, необходимых для начала расчета, используются параметры определенного вида обработки. При этом в качестве ограничительной функции, в зависимости от решаемых технологических задач, будет использоваться заданная глубина упрочненного слоя, степень упрочнения или шероховатость поверхности. При переборе и анализе вариантов принимается во внимание лишь подмножество проектных решений, удовлетворяющее заданным техническим условиям и заданной величине точности.

Список литературы

1. Технологические основы оптимизации отделочно-упрочняющей обработки деталей в гранулированных рабочих средах / М.А. Тамаркин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 11. – С. 12-16.
2. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
3. Кокорева О.Г. Управление параметрами качества поверхности деталей машин при статико-импульсной обработке // Технология металлов. 2016. №6. С. 16-20.

4. Грубый С.В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 149 с.
5. Кокорева О.Г. Исследование параметров качества поверхностного слоя тяжело нагруженных деталей машин, упрочненных методами поверхностно-пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 11. С. 487-490.

Сведения об авторе:

Кокорева Ольга Григорьевна – к.т.н., доцент, МГАВТ, г.Москва.

MODELING OF THE CONTACT PLOT WHEN STRENGTHENING BY SURFACE AND PLASTIC DEFORMATION BY METHODS

Kokoreva O.G.

Keywords: durability, performance properties, surface plastic deformation, hardening, contact area, modeling, indenter, technological process.

Abstract. Technological features of hardening of surfaces of details at surface plastic deformation are considered. (PPD) The advantages of surface treatment by PPD methods are noted. A mathematical model of the interaction of the indenter and the treated surface is developed. Methods of analytical forecasting of parameters of quality of a surface layer of the details processed by methods of PPD are developed.

References

1. Technological bases of optimization of finishing and hardening processing of parts in granular working environments / M.A. Tamarkin and others // Strengthening technologies and coatings. - 2015. - № 11. - P. 12-16.
2. Drozd M.S. Engineering calculations for elastoplastic contact deformation / M.S. Drozd, M.Matlin, Yu. I. Sidyakin. - Moscow: Mechanical Engineering, 1986. - 224 p.
3. Kokoreva O.G. Control of the quality parameters of the surface of machine parts with static-pulse processing // Technology of metals, No. 6, 2016, p.16-20.
4. Gruby S.V. Optimization of the machining process and control of regime parameters. - Moscow: Because of MSTU N.E. Bauman, 2014. - 149 p.
5. Kokoreva O.G. Investigation of the quality parameters of the surface layer of heavily loaded machine parts, strengthened by methods of surface plastic deformation // Strengthening technologies and coatings. № 11, 2017. P. 487-490.