

УДК 621.787.4: 620.186.4

Журавлёв Ю.И.
ОНМА

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРЯЖЕНИЙ «ВАЛ-ВТУЛКА» ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Упрочнение деталей является одним из основных методов повышения надёжности и долговечности работы машин и в ряде случаев бывает эффективнее конструктивных усовершенствований [1]. Экономические преимущества при эффективном применении упрочнения поверхностей деталей можно ориентировочно представить, руководствуясь данными таблицы.

Таблица. Эффект от применения технологии упрочнения различных деталей

Обрабатываемые детали	Вид обработки	Источник	Повышение	
			долговечности, %	усталостной прочности, %
Сварные соединения	Дробенаклёп	[2]	300	-
Валы коленчатые	Дробенаклёп	[2]	500	-
Оси	Обкатывание	[3]	-	70
Зубья конических колёс	Обкатывание	[3]	500...600	-

Простота и экономичность методов упрочнения позволяют использовать их практически на всех предприятиях, в том числе и в судовых ремонтных мастерских. Однако научные основы применения этих методов и технологические методики назначения режимов упрочнения базируются главным образом на обобщении экспериментального материала или использовании упрощённых физических моделей [1; 4; 5 и др.].

Это приводит к тому, что каждый раз при разработке новой детали приходится повторять многочисленные эксперименты для выбора режимов упрочнения поверхности детали. Такое положение дел неэффективно: сроки конструкторско-технологической подготовки производства существенно удлиняются, повышается стоимость изде-

лия. Зачастую экспериментальные исследования вообще не позволяют дать рекомендации по выбору оптимального режима упрочнения детали из-за погрешностей, возникающих при проведении экспериментов.

В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на создание математических моделей процессов поверхностного пластического деформирования деталей на основе механики деформируемых тел.

Разработан и реализован эффективный алгоритм численного моделирования таких процессов. Алгоритм основан на использовании метода конечных элементов [6]. Процесс движения инструмента по детали рассматривается в квазистатической постановке. Последовательно рассчитывается взаимодействие инструмента и детали в каждой точке траектории движения инструмента. При этом учитывается изменение геометрии и свойств материалов детали и инструмента, произошедшее на предшествующих этапах их взаимодействия. В каждой точке контактирования движущегося инструмента и детали решается контактная задача. Для решения контактной задачи применяется релаксационный алгоритм [7], хорошо зарекомендовавший себя при решении других типов контактных задач. При каждом решении контактной задачи дополнительно определяется, какой процесс происходит в каждой точке контактирования инструмента и детали: нагружение или разгрузка. Если происходит разгрузка, то в данной точке для связи напряжений и деформаций применяется закон Гука, иначе процесс решения строится с использованием метода переменных параметров упругости. Согласно деформационной теории, связь между напряжениями и деформациями устанавливается следующей зависимостью [8]:

$$\varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon_0 = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0),$$

где σ_{ij} - тензор напряжений; ε_{ij} - тензор деформаций; δ_{ij} - символ Кронекера; σ_0 - среднее давление в точке; ε_0 - средняя деформация в точке; σ_i - интенсивность напряжений; ε_i - интенсивность деформаций; $i, j = 1, 2, 3$.

Для описания процесса сложного нагружения, а именно такое нагружение происходит при контактном взаимодействии [9], лучше использовать теорию течения, которая, в отличие от деформацион-

ной теории, связывает приращения напряжений с деформациями и приращениями деформаций [10]:

$$d\sigma_{ij} = 2G \left(d\varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} \delta_{ij} d\varepsilon_{ii} - s_{ij} \frac{s_{kl} d\varepsilon_{kl}}{S} \right),$$

$$S = \frac{2}{3} \sigma_i^2 \left(1 + \frac{H'}{3G} \right),$$

где $d\sigma_{ij}$ - приращение тензора напряжений; $d\varepsilon_{ij}$ - приращение тензора деформаций; s_{ij} - приращение девиатора напряжений; σ_i - интенсивность напряжений; δ_{ij} - символ Кронекера; H' - тангенс угла наклона деформационной кривой в точке, соответствующей σ_i ; μ - коэффициент Пуассона; G - модуль упругости второго рода; $i, j, k, l = 1, 2, 3$.

Согласно исследованиям ряда авторов, например И.А. Биргера и Р.Р. Мавлютова [11], если реализовать процесс решения с использованием деформационной теории в шаговой постановке, то и она вполне пригодна для расчёта сложного нагружения. К тому же процесс решения задачи по деформационной теории происходит значительно быстрее, чем при использовании теории течения, что особенно заметно при решении контактных задач движения.

Описываемая математическая модель процесса упрочнения чрезвычайно эффективна. В отличие от других моделей она целиком основана на механике деформируемых тел. Для проведения математического моделирования не нужны никакие дополнительные экспериментальные исследования (например, для установления форм и размеров областей детали и инструмента, в которых их материалы деформируются упругопластически). Единственные экспериментальные данные, используемые при моделировании процесса упрочнения, – это свойства материалов взаимодействующих тел (параметры упругости и диаграммы деформирования).

Для апробации и тестирования предложенной математической модели выполнены решения ряда тестовых и прикладных задач. Результаты этих решений сопоставлены со значениями, полученными как экспериментально, так и теоретически с использованием метода конечных элементов и метода граничных элементов другими исследователями. Когда это было возможно, для апробации результатов

использовались также аналитические решения. Все полученные результаты подтверждают адекватность рассмотренной математической модели процесса.

В данной статье рассматривается сопоставление результатов математического моделирования с данными, полученными экспериментально при обкатывании вала диаметром $D_в=58$ мм из стали 45 при следующих условиях: частота вращения вала $\omega=20$ мин⁻¹, осевая подача деформирующего ролика $S_x=0,17$ мм/об, диаметр ролика $D_p=100$ мм, профильный радиус ролика $R_{rp}=3$ мм, профиль рабочей части ролика - окружность. Экспериментальные данные заимствованы из источника [4].

Эксперимент выполнен методом делительных сеток. Сущность эксперимента заключалась в следующем. Цилиндрический образец состоял из двух строго фиксированных друг относительно друга частей, соединённых винтами по меридиональным плоскостям. На плоскости соединения методом царапания наносилась координатная

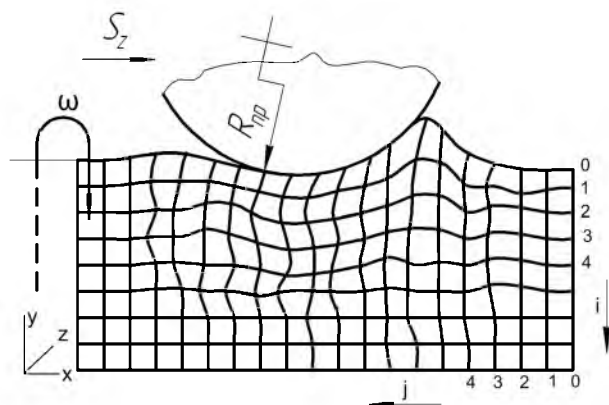


Рис. 1. Координатная сетка при выполнении эксперимента методом делительных сеток

сетка с шагом 0,2 мм (рис. 1). Для этого использовался микротвердомер ПМТ-3 совместно с микроскопом БМИ-1. После обкатывания образец вновь разделяли на две части и определяли смещения центров ячеек, образованных пересечением линий координатной сетки.

При этом различали этапное изменение геометрии ячейки, которое определяли сравнением двух соседних ячеек j и $j+1$, и накопленное, определяемое сравнением данной ячейки j с недеформированной ячейкой. Количественное определение координат точек сетки выполняли с использованием микроскопа.

По замеренным этапным смещениям вычисляли скорости и интенсивность деформаций, а по ним - интенсивность напряжений и

компоненты напряжений, предполагая, что напряжённое состояние является плоским. Для вычисления интенсивности напряжений использовалась зависимость между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций, полученная экспериментально:

$$\sigma_i = 360 + 2400\varepsilon_i - 2200\varepsilon_i^2, \quad (1)$$

где σ_i - интенсивность напряжений, МПа; ε_i - интенсивность деформаций.

Аналізу подвергалось поле, содержащее 13 горизонтальных и 35 вертикальных линий координатной сетки.

Следует отметить, что при малых деформациях метод сеток может приводить к значительным погрешностям, сравнимым с величиной деформации. По этой причине результаты в ячейках с номерами более 27 следует воспринимать как ориентировочные [4]. Поэтому далее при сопоставлении результатов будут использоваться только данные в ячейках с номерами от 0 до 25 включительно.

Для математического моделирования использовалась конечно-элементная модель фрагментов ролика и вала (рис. 2). Модель состоит из 30 912 узлов и 26 752 8-узловых конечных элементов.

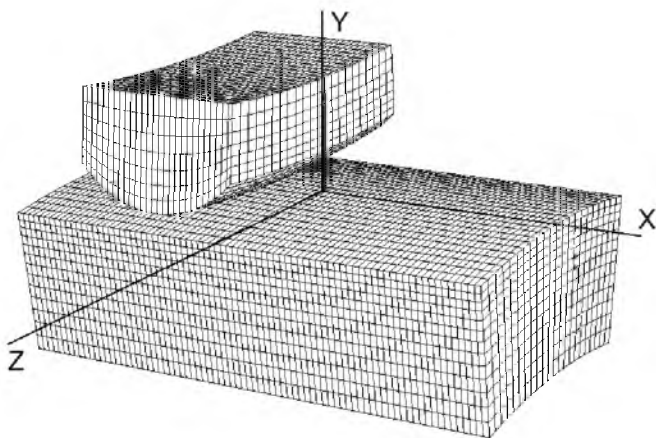


Рис. 2. Конечноэлементная модель для расчёта упрочнения вала обкаткой роликом

Модуль упругости и коэффициент Пуассона для ролика и вала приняты одинаковыми: $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0,3$. Трением между роликом

и валом пренебрегли (коэффициент трения принимался равным 0), хотя в принципе разработанный алгоритм математического моделирования процесса упрочнения способен учитывать трение между контактирующими деталями. Материал ролика предполагался упругим, при задании упругопластических свойств материала вала использовалась диаграмма деформирования, представленная зависимостью (1). Предел текучести стали 45, из которой выполнен вал, принят равным 360 МПа.

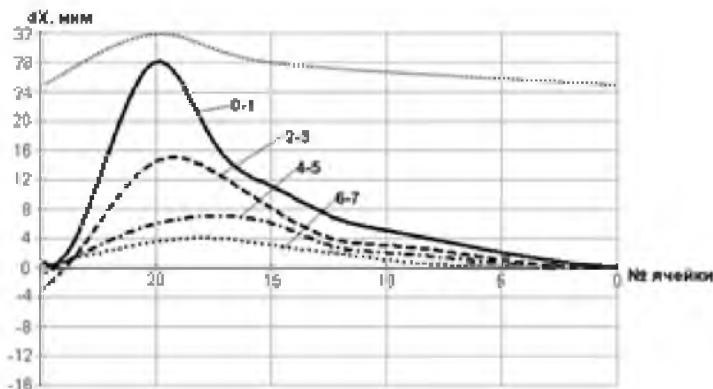
В ходе эксперимента замерена величина радиального смещения ролика относительно вала, равная 0,05 мм [4]. При математическом моделировании процесс нагружения задавался смещением ролика в отрицательном направлении оси Y на величину замеренного радиального смещения (0,05 мм).

В ходе расчёта выполнено моделирование качения ролика вокруг вала. Качение происходило по 14 дорожкам с осевой подачей в направлении оси X 0,17 мм. Длина каждой дорожки составляла 9,8 мм. Количество дорожек и их длина выбирались из условия достижения стационарной фазы обработки. (Для сравнения: вычисленный размер первоначального пятна контакта ролика и вала в направлении качения равен 3,2 мм, а в направлении подачи - 1,19 мм.)

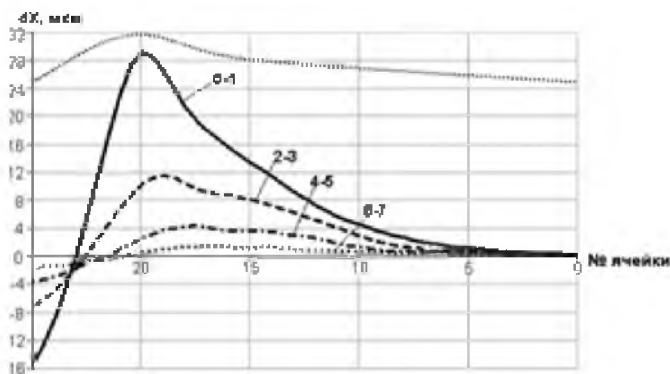
На рис. 3, 4 показаны графики, характеризующие искажение ячеек в области возникновения так называемой пластической волны - волны металла, которая движется в направлении подачи инструмента перед роликом. В верхней части каждого рисунка линией, состоящей из точек, схематично показан профиль волны. Цифрами на рисунках обозначены номера горизонтальных рядов координатных линий, между которыми замерено этапное значение смещения. Например, линия 0 – 1 соответствует центрам первого ряда ячеек сетки, если считать от поверхности вала.

Смещение dX (рис. 3), положительное направление которого совпадает с направлением подачи, имеет максимальное значение в вершине волны. На рис. 3а изображены зависимости изменения этапных горизонтальных смещений, полученные экспериментально, а на рис. 3б – теоретически. Форма графиков на обоих рисунках совпадает. Небольшие отличия имеются лишь в области с номерами ячеек, близкими к 25, что, по-видимому, объясняется погрешностью эксперимента. Максимальное теоретическое значение смещения dX , соответствующее вершине волны (29 мкм), практически совпадает с экспериментальным значением (28 мкм). При сравнении смещений,

соответствующих линиям 2-3, 4-5 и 6-7, можно заметить некоторые отличия. Очевидно, что результаты, полученные теоретически, точнее, так как им не присуща погрешность из-за известного недостатка метода сеток (чем меньше деформации координатных линий, тем больше погрешность).



а)

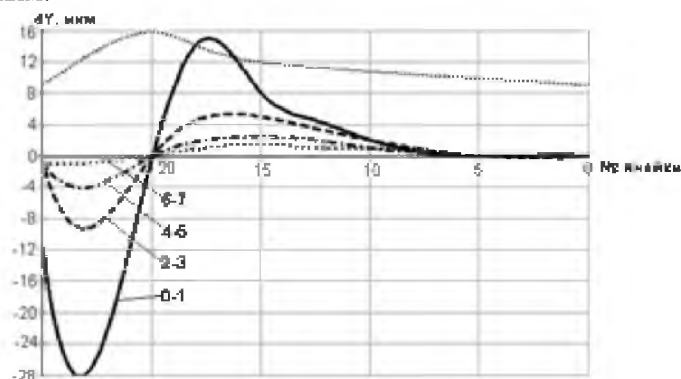


б)

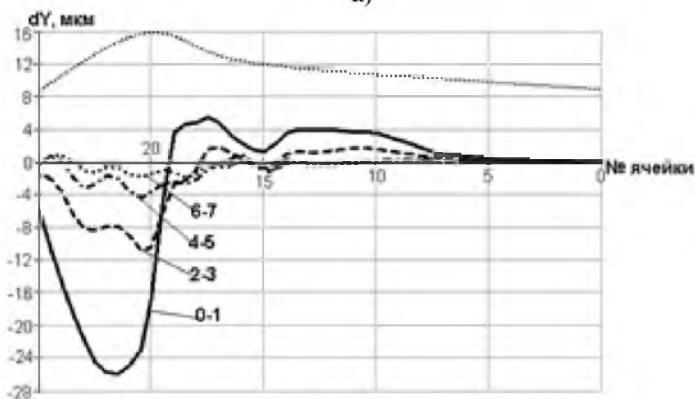
Рис. 3. Распределение этапных значений горизонтальных смещений dX : а – эксперимент; б - математическая модель

Этапное смещение dY , положительное направление которого совпадает с направлением «из тела заготовки» (рис. 4), так же как и dX , принимает максимальное значение в вершине волны. В правой части волны смещение dY положительное, а в левой – отрицательное. В левой части волны графики распределения смещений dY для

эксперимента и расчёта имеют очень хорошее совпадение по форме и значениям.



а)



б)

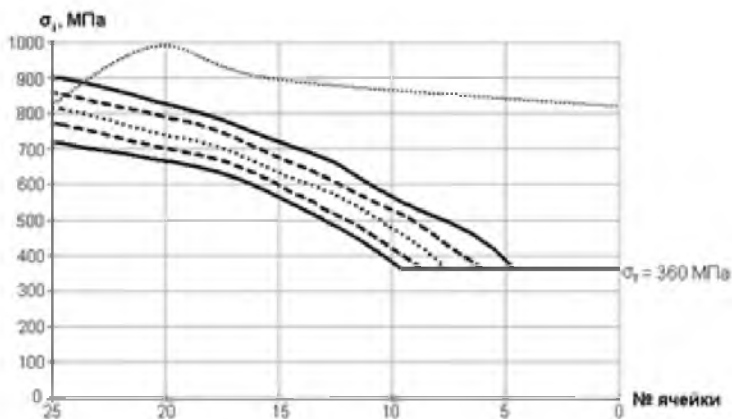
Рис. 4. Распределение этапных значений вертикальных смещений dY : а – эксперимент; б - математическая модель

Например, максимальное смещение на линии 0-1 для эксперимента равно -28 мкм, а для математической модели - -26 мкм. В правой части профиля волны такого совпадения результатов не наблюдается. Значения, полученные расчётом, меньше экспериментальных данных. Сразу однозначно ответить на вопрос, какие результаты в этой области волны точнее, сложно. Весьма логичным является мнение, что если состояние металла перед волной и в областях «под инструментом» и «за инструментом» совпадает для математической модели и эксперимента, то велика вероятность и того, что между

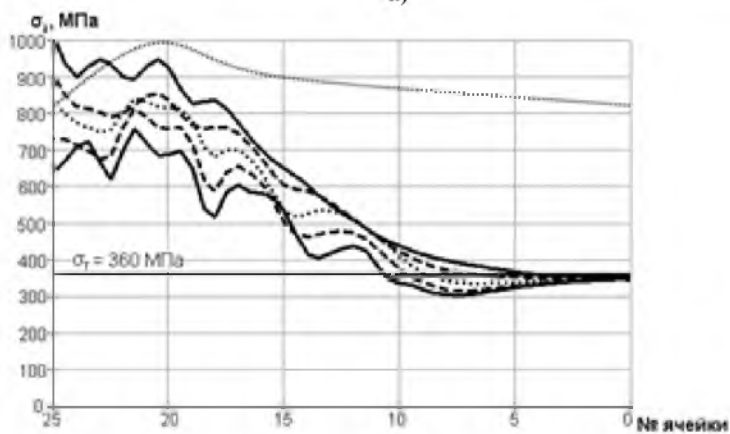
этими областями математическая модель адекватно описывает процесс упрочнения.

Сопоставление компонент деформаций и напряжений, полученных при математическом моделировании, с данными эксперимента не проводилось. При проведении эксперимента компоненты деформаций не замерялись и не вычислялись. В работе [4] по этапным смещениям рассчитывались скорости деформаций. По скоростям деформаций вычисляли накопленную интенсивность деформаций, а по ней с помощью кривой деформирования - интенсивность напряжений. Компоненты напряжений при проведении эксперимента определяли, используя интенсивность напряжений и скорости деформаций. При этом применялся ряд допущений и предположений о характере распределения напряжений. Так как компоненты напряжений при проведении эксперимента напрямую не замерялись, то сравнивать их с компонентами напряжений, полученными по математической модели, не будем. Ограничимся приведением графиков распределения интенсивности напряжений (рис. 5), которые также свидетельствуют о совпадении экспериментальных и теоретических результатов исследований. Следует отметить, что при математическом моделировании получились иные законы распределения напряжений. Скорее всего, различия объясняются несовершенством методики расчёта напряжений, применявшейся при обработке экспериментальных данных.

Предложенную математическую модель процесса упрочнения обработкой металлов давлением можно считать адекватно описывающей поведение материала при упрочнении. Конечно, в некоторых случаях имеются расхождения, причины появления которых следует проанализировать. Математическое моделирование процесса упрочнения позволяет получать распределения всех компонент полей перемещений, деформаций и напряжений во всех точках детали и инструмента. Предложенная модель позволяет с использованием ЭВМ устанавливать связь режимов обработки с параметрами поверхностного слоя детали, а также с параметрами протекания процессов разрушения в детали и инструменте, определять их долговечность.



а)



б)

Рис. 5. Распределение значений интенсивности напряжений σ_1 :
а – эксперимент; б - математическая

Экономически целесообразно применение разработанного на основе данной модели программного комплекса для проектирования новых и модернизации существующих деталей средств транспорта, исследовании сопряжений «вал-втулка».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матлин, М.М. Закономерности упругопластического контакта в задачах поверхностного пластического упрочнения: монография // М.М. Матлин, С.Л. Лебский, А.И. Мозгунова. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 218 с.
2. Медведев, С.Ф. Методы повышения динамической прочности стальных деталей машин и конструкций // С.Ф. Медведев. – Куйбышев, 1962. – 360 с.
3. Олейник, Н.В. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин // Н.В. Олейник, В.П. Кычин, А.Л. Луговской. – Киев: Техника, 1984. – 151 с.
4. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием // В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
5. Браславский, В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами // В.М. Браславский. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
6. Zienkiewicz, O.C. The Finite Element Method. Fifth Edition. V. 2. Solid Mechanics // O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. - Butterworth-Heinemann, 2000. - 459 p.
7. Сакало, В.И. Контактные задачи железнодорожного транспорта // В.И. Сакало, В.С. Коссов. - М.: Машиностроение, 2004. – 496 с.
8. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учеб. для студентов вузов / Н.Н. Малинин. - М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
9. Матлин, М.М. Использование обобщенной кривой деформирования для расчета параметров упругопластического контакта / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова // Изв. ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград, 2007. – Вып. 1. - № 3(29). - С. 73 — 75.
10. Yamada, Y. Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elastic-plastic problems by the finite element method / Y. Yamada, N. Yoshimura, T. Sakurai // International Journal of Mechanical Sciences. – 1968. - V. 10. - № 5. - P. 343-354.
11. Мавлютов, Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций / Р.Р. Мавлютов. - М.: Наука, 1981. - 141 с.