

В.В. Зелинский

V.V. Zelinskiy

Муромский институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет»
Murom Institute of Vladimir State University

НОВЫЙ ПОДХОД В ТЕОРИИ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ВАЛОВ НАКАТЫВАНИЕМ

A NEW APPROACH TO THE THEORY OF SURFACE HARDENING ROLLING SHAFT

Для поверхностного упрочнения валов накатыванием изучены причины образования дефектов в очаге деформации, на условия отсутствия которых предложена коническая форма накатного ролика, обеспечивающая однородную деформацию. На основе рассмотрения взаимосвязи режимных факторов и введения фактора трения ролика о поверхность проведено математическое моделирование процесса пластического деформирования с использованием теории пластичности. Результаты модельных расчетов показали достаточное соответствие экспериментальным результатам.

Ключевые слова: накатывание, упрочнение, вал, поверхностное упрочнение.

For surface hardening rolling shaft studied the causes of defects in the deformation on the absence of which offered a conical shape rolling roll, providing a homogeneous deformation. Based on consideration of the relationship of regime factors and the introduction of friction factor on the surface of the roller the mathematical modeling of plastic deformation using the theory of plasticity. The results of model calculations have shown substantial conformity with experimental results.

Key words: rolling, hardening, surface hardening, shaft.

При накатывании в зоне контакта тороидального ролика с валом возникает очаг деформации. Традиционно считается, что его размеры и форма определяются радиусом R рабочего профиля ролика и радиальным усилием F прижатия ролика к валу. Однако при рассмотрении процесса деформирования в общей постановке становится ясным, что фактор F не может считаться объективным, так как одно и то же усилие для материалов с разными механическими свойствами вызывает разные деформации и, следовательно, разные размеры и форму очага деформации. Целесообразно за фактор F принять не усилие, а глубину внедрения a ролика в тело вала (величину натяга).

При накатывании перед роликом образуется волна вспучивания. Установлено [1], что разрушения развиваются в ее вершине. При этом образовав-

шаяся наружная трещина закатывается роликом, становясь внутренним дефектом поверхностного слоя. Эта поврежденность частично может залечиваться, но оставшаяся часть будет определять эксплуатационные надежность и долговечность вала.

Анализ условий деформирования поверхностного слоя вала в пределах дуги контакта с роликом показал: а) в осевом сечении деформация вдоль этой дуги неоднородна из-за переменной угла между профилем ролика и валом, б) в касательной плоскости окружные деформации растяжения, обуславливающие появление трещины, из условия постоянства объема при пластическом деформировании вызываются осевыми деформациями сжатия. В связи с этим критические деформации растяжения локализуются в вершине волны, как в наиболее ослабленном сечении. Увеличение сечения волны можно обеспечить снижением угла между профилем ролика и поверхностью вала (угла контакта) и его стабилизацией. Такую геометрию волны дает ролик с конической рабочей поверхностью, который, кроме того, благодаря постоянству угла контакта обеспечивает более однородную деформацию.

При поиске эффективных режимов накатывания традиционно используется эмпирический путь. Однако он не позволяет прогнозировать направление и уровень влияния отдельных факторов, затрудняет раскрытие общих закономерностей формирования параметров упрочнения, не обеспечивает использование ЭВМ для оптимизации технологии накатывания. Поэтому было применено математическое моделирование на основе теории обработки металлов давлением с учетом контактного трения ролика о деталь. Адекватность принятой теоретической модели условиям поверхностного деформирования оценивалась по виду преобладающей деформации, по напряженно-деформированному состоянию, по форме очага деформации.

Принципиально новым для накатывания является учет контактного трения ролика о деталь. Сопротивление сдвигу является общепризнанным параметром локального пластического контакта. При этом локальный пластический контакт находится в условиях комбинированного нагружения нормальной и касательной нагрузками, регламентированного условием пластичности. В соответствии с теорией обработки металлов давлением контактное трение может возбудить на поверхности касательное напряжение τ , достигающее величины $0,5\sigma_s$ (σ_s – истинный предел текучести). Для толщины упрочняемого при накатывании слоя влияние τ такого уровня весьма существенно. Таким образом, трение ролика о деталь является составной частью общей структуры неоднородного деформирования, имеющей частные и общие признаки (законы трения и напряженно-деформированное состояние). При этом условия трения не являются граничными, они возникают по законам самоорганизации [2].

При решении практических задач по накатыванию возникают трудности, связанные с учетом объемности напряженно-деформированного состояния. Решения становятся настолько громоздкими, что теряют свою инженерную ценность. С достаточным для практики приближением при накатывании валов можно принять плоское деформированное состояние, а материал считать жесткопластическим (упругие деформации отсутствуют). Для выбора плоскости деформирования имеется ряд косвенных признаков. Прежде всего, к ним относятся результаты экспериментальных исследований процесса накатывания [3] (проведенные в ЦНИИ МПС и ставшие классическими), показавшие, что осевые напряжения являются наибольшими, а радиальные – наименьшими. Аналогичные выводы делаются в работе [1].

С учетом изложенного процесс накатывания моделировался взаимодействием конического индентора с жесткопластическим полупространством. Индентор, нагруженный нормальной и касательной нагрузками, перемещается в условиях пластического вдавливания и внедрен в полупространство на величину a . Образующая конического индентора составляет с границей полупространства угол контакта β . Пластическая деформация, вызванная индентором, распространяется на глубину h . Вдоль контактной поверхности действует удельная сила трения. Применялось условие пластичности Треска.

В расчетах использовался метод баланса работ внешних и внутренних сил для очага деформации [4, 5], предполагающий отсутствие влияния касательной силы на распределение главных напряжений, но учитывающий возможность изменения механических свойств материала (упрочнение).

Для учета процесса упрочнения в моделировании использовалась опытная кривая упрочнения для стали 40Х [5]. Анализ кривой упрочнения показал, что в исследуемом диапазоне относительных деформаций для нее характерно пологое повышение предела текучести. Поэтому с достаточной точностью зависимость предела текучести σ_s от относительной деформации можно линеаризировать и представить в виде

$$\sigma_s = \sigma_0 + \Pi_0 \varepsilon,$$

где σ_0 – экстраполированный предел текучести при отсутствии деформации; Π_0 – модуль упрочнения; ε – относительная деформация.

При введении соответствующих обозначений данное уравнение приводится к уравнению в относительной форме:

$$\varphi = \Pi \varepsilon,$$

где φ – относительная степень упрочнения; Π – относительный модуль упрочнения.

В результате математического моделирования была получена зависимость, позволяющая выявить влияние условий накатывания и способности материала к упрочнению на относительную степень упрочнения φ в виде функции

$$\varphi = f\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}, \beta, \mu, \Pi\right), \quad (1)$$

где σ – нормальное к поверхности вала напряжение; μ – коэффициент контактного трения.

В плоской постановке при нестесненном пластическом деформировании проекция b площади контакта S конического индентора с полупространством (если пренебречь образованием наплыва) всегда пропорциональна глубине внедрения a , т.е.

$$b = ka,$$

где k – коэффициент пропорциональности.

С другой стороны, нормальную нагрузку F , действующую на индентор, можно определить по уравнению

$$F = q_m bz = q_m \cdot kaz, \quad (2)$$

где q_m – среднее давление в контакте; z – линейный размер, перпендикулярный главной плоскости деформирования, $z=1$.

Известно [6], что при нестесненном пластическом деформировании $q_m = C\sigma_s$ (C – константа, зависящая от трения и геометрии индентора). Предполагая, что независимо от глубины внедрения и нагрузки на площади контакта всегда существует линейный размер l_0 , на котором внешняя нагрузка инициирует постоянную интенсивность влияния (погонную нагрузку), из выражения (2) можно получить

$$\frac{a}{l_0} = \frac{F}{C\sigma_s kz l_0} = \frac{\sigma}{\sigma_s},$$

$$a = l_0 \frac{\sigma}{\sigma_s}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует важный вывод о том, что при нестесненном пластическом деформировании, имеющем место в процессе накатывания роликом, отношение σ/σ_s прямо пропорционально глубине внедрения a . Проведенные оценочные расчеты это полностью подтвердили.

Таким образом, для конкретного материала вала и принятых условий смазывания Π и μ – постоянные величины. Поэтому решение уравнения (1), являясь функцией двух аргументов, в трехкоординатной системе представляет собой некую поверхность φ .

Экспериментальное определение одного из значений φ при произвольно выбранном сочетании a и β (например, для образца № 1) позволяет установить величину произведения kC , удовлетворяющую всем точкам поверхности φ и, следовательно, всем сочетаниям a и β . Следовательно, на основании выражения (3) в уравнении (1) величина σ/σ_s является пропорциональной глубине внедрения a . Таким образом, при $\Pi = \text{const}$ и $M = \text{const}$ уравнение (1) приводится к функции

$$\varphi = f(a, \beta).$$

Экспериментальная оценка достоверности разработанной математической модели проводилась с использованием конических роликов с углами контакта 5, 10, 15 и 20° при величинах натяга 0,25–1,75 мм. С целью сравнительной оценки проводились опыты с тороидальным роликом. Накатывались образцы валов из стали 40X диаметром 60 мм.

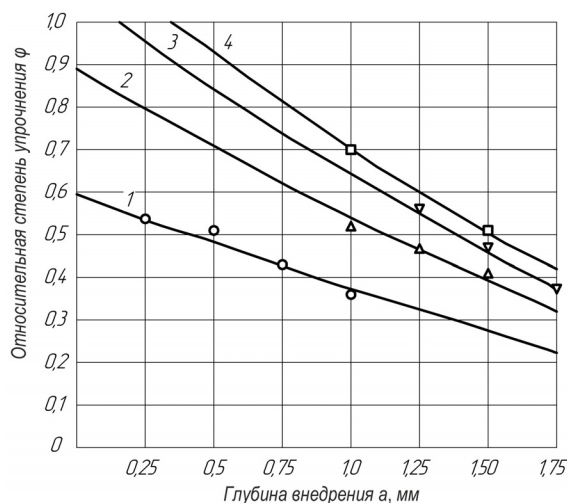


Рис. Зависимость относительной степени упрочнения φ от глубины внедрения a и угла контакта β (сплюснутые линии – расчет, точки – эксперимент; 1 – $\beta = 5^\circ$, 2 – $\beta = 10^\circ$, 3 – $\beta = 15^\circ$, 4 – $\beta = 20^\circ$)

Степень упрочнения накатанных образцов оценивалась по приросту относительной микротвердости поверхности. Микротвердость измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3М по соответствующей методике.

Результаты расчета показали близкое соответствие результатам опытов (рисунок), что указывает на достоверность примененного математического моделирования. При этом было установлено, что угол контакта и натяг существенно влияют на параметры упрочнения, а ролик с конической рабочей поверхностью по упрочняющей способности более эффективен, чем тороидальный (в 1,5–1,6 раза).

Работа выполнялась в рамках хозяйственной НИР, заказчик «Горьковская железная дорога – филиал ОАО «Российские железные дороги».

Список литературы

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Макушок Е.М. Основные направления развития механики трения // Трение и износ. – 1995. – № 3, Т. 16. – С. 416–427.
3. Школьник Л.М., Шахов В.И. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. – М.: Машиностроение, 1964. – 184 с.
4. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров: пер. с англ. / пер. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
5. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
6. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

Получено 7.02.2012