

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

И.В. Сидько, Е.С. Фоменко

Рассмотрен метод диагностики состояния поверхностного слоя стальных деталей при поверхностном пластическом деформировании. Определен момент максимального упрочнения. Метод основан на воздействии на деталь шумом широкого спектра и последующем анализе выходного сигнала. Для обработки тестовых сигналов использован корреляционный метод, исключающий влияние внешнего шума на результаты исследований.

Ключевые слова: диагностика, поверхностный слой, поверхностное пластическое деформирование, момент максимального упрочнения, широкоспектральный шум, корреляционный метод, метод неразрушающего контроля, упрочняющая обработка.

Введение

Процесс обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД) является одним из наиболее распространенных и эффективных упрочняющих процессов. Однако обработка ППД связана с риском перенаклепа поверхности. Для повышения эффективности ППД необходимо использовать метод неразрушающего контроля (МНК) и диагностики качества поверхностного слоя. При этом метод должен быть легко осуществимым на производстве.

Согласно работе [1] для стальных деталей наиболее применимы токовихревой, акустический, радиационный, магнитный и оптический МНК. Однако стоит отметить, что указанные методы имеют узкую область применения или требуют дорогостоящего сложного в управлении оборудования. При этом за основу берется ограниченное число параметров, принимаемых в качестве основополагающих. Для того чтобы успешно осуществить не только контроль, но и диагностику качества поверхностного слоя, при ППД необходимо применять более широкий подход. Качество поверхности должно фиксироваться в процессе обработки методом, в котором не требуется сложения многочисленных параметров.

Теоретические аспекты энергетических изменений поверхности деталей при их обработке ППД

Современные исследования свидетельствуют о том, что качество поверхностного слоя детали непосредственно связано с энергетическим состоянием ее поверхности, т.е. с количеством энергии, накопленной в поверхностном слое в процессе деформации. Особенно явно данная связь проявляется при обработке деталей ППД. Основным показателем энергетического состояния поверхностного слоя является скрытая энергия деформирования. Эта энергия, накапливаемая в материале поверхностного слоя в результате формирования дефектов кристаллического строения, как правило дислокаций, при обработке ППД, определяет существенное изменение таких структурно-чувствительных свойств, как сопротивление пластической деформации, релаксация различных видов, магнитная проницаемость, остаточная намагниченность и электросопротивление. Важно отметить, что процесс накопления энергии характеризуется ярко выраженной стадийностью [2, 3]. При этом стадии накопления энергии предположительно совпадают со стадиями упрочнения.

В табл. 1 приведены обобщенные сведения о стадиях упрочнения материала поверхностно-

Таблица 1

**Стадии упрочнения материала поверхностного слоя и накопления энергии
в поверхностном слое детали**

Стадия	Характерные особенности
I	Облегченное скольжение дислокаций. Стадия характеризуется малым коэффициентом упрочнения в результате того, что лишь часть свободно скользящих дислокаций задерживается у субграниц зерен. Большая часть затраченной на деформирование энергии (80 – 90 %) поглощается металлом в результате свободного образования новых дислокаций, которое связано с очень малой их плотностью на данной стадии ($\Lambda \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ м}^{-2}$). На кривой накопления энергии заметно очень быстрое ее увеличение. Обычно стадия I прекращается после небольшой деформации (1 – 5 %)
II.I	По сути, это промежуточное состояние между стадиями упрочнения I и II. Осуществляется накопление необходимого количества препятствий для движения дислокаций, обеспечивающих постоянный коэффициент деформационного упрочнения
II.II	Дислокации движутся в пересекающихся плоскостях скольжения с образованием при их встрече дополнительных препятствий. Накопление материалом энергии протекает равномерно (7 – 12 % общей энергии деформации)
III	Уменьшение коэффициента и скорости деформационного упрочнения. При достижении деформации, превышающей некоторую критическую, образование и движение дислокаций становятся затруднительными. Движущиеся дислокации огибают препятствия вместо их перерезания. Большая часть затрачиваемой на деформацию энергии переходит в теплоту. Накопление энергии деформации в поверхностном слое практически прекращается. На данной стадии материал поверхностного слоя достигает максимального уровня упрочнения
IV (начало разрушения)	Значительное уменьшение коэффициента деформационного упрочнения. Критическая плотность дислокаций приводит к взаимному отталкиванию их друг от друга. В результате начинается зарождение микротрещин, сопровождающееся высвобождением ранее накопленной энергии в виде теплоты

Примечание. Стадии накопления энергии II.I и II.II соответствуют стадии упрочнения II, характеризующейся сравнительно постоянным и большим (относительно стадии I) коэффициентом деформационного упрочнения.

го слоя и накопления энергии в поверхностном слое детали.

На рис. 1 приведена зависимость скрытой энергии деформирования от плотности дислокаций. Зависимость построена в соответствии с формулой [4 – 6]

$$W_{\text{ск}} = \frac{Gb_k^2}{4\pi(1-\nu)\sqrt{\Lambda_{\text{тек}}}} \ln \frac{1}{b_k \sqrt{\Lambda_{\text{тек}}}}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига обрабатываемого материала, Па; b_k – модуль вектора Бюргерса, м; ν – коэффициент Пуассона; $\Lambda_{\text{тек}}$ – текущая плотность дислокаций, м^{-2} .

На рис. 1 обозначены стадии накопления энергии, обусловленные сменой поведения зависимости. Экстремум зависимости соответствует критическому уровню скрытой энергии деформации и предположительно совпадает с началом зарождения микротрещин в результате перенасыщения поверхностного слоя дислокациями. Как свидетельствуют исследования, приведенные в работах [2, 3], первая стадия упрочнения протекает при $\Lambda \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ м}^{-2}$. Ми-

нимальное значение плотности дислокаций Λ (а следовательно, значение скрытой энергии деформирования) для реальных деталей зависит от специфических свойств материала и метода обработки заготовки. Некоторая критическая плотность дислокаций, по достижении которой скольжение происходит по вторичным системам скольжения, для сталей находится приблизительно в диапазоне $\Lambda \approx 10^4 \dots 10^6 \text{ м}^{-2}$, что соответствует наступлению стадии II.II. Пере-

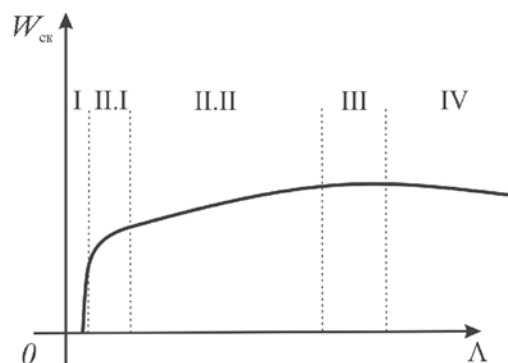


Рис. 1. Зависимость скрытой энергии деформирования $W_{\text{ск}}$ от плотности дислокаций Λ

насыщение дислокациями, как правило, наступает при превышении плотности дислокаций Λ , приблизительно равной $10^{15} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$ в зависимости от свойств материала.

Особый интерес представляет переход от стадии III к стадии IV. На всех предыдущих отрезках кривой (см. рис. 1) накопление энергии в общем виде происходит в соответствии с некоторым линейным выражением [7]. Однако в определенный момент стадии III наступает момент максимального упрочнения [8]. Этот момент соответствует максимальным значениям скрытой энергии деформирования, электросопротивления и минимальным значениям магнитной проницаемости материала. Подобное состояние длится в течение некоторого, не очень продолжительного времени, а затем начинается процесс разрушения поверхностного слоя, связанный с перенасыщением его дислокациями. При этом закон накопления энергии перестает действовать. Связи между дислокациями разрушаются, что приводит к выделению теплоты. Баланс системы «электросопротивление – магнитная проницаемость – температура» нарушается.

Учитывая, что момент максимального упрочнения характеризуется значительным изменением физических и энергетических параметров материала поверхностного слоя, его наступление может быть диагностировано по импульсным характеристикам детали.

Основные положения метода неразрушающего контроля импульсных характеристик деталей широкополосным шумом

Для осуществления неразрушающего контроля энергетического состояния ПС предлагается метод исследования обрабатываемой

детали широкополосным шумом. Метод основан на воздействии на деталь тестовым сигналом, соответствующим квазибелому гауссовому шуму. Выходной сигнал фиксируется, коррелируется с исходным и в результате дает импульсную характеристику $h(\tau)$ исследуемого объекта. Разрушение детали, следующее за стадией упрочнения III и, соответственно за накоплением критического количества скрытой энергии деформирования, приводит к переходу от изначальной условно линейной системы (процесс прохождения шума через обрабатываемую деталь) к нелинейной. Это отражается на корреляционной функции импульсных характеристик исследуемого объекта.

Импульсную характеристику целесообразно получать в виде реакции $y(t)$ исследуемого объекта (обрабатываемой детали) на стационарный широкополосный шум $x(t)$ (рис. 2).

Корреляционная связь между входным и выходным сигналами определяется при помощи соотношения Винера – Ли [9, 10]:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau - \lambda) R_{xx}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $R_{xy}(\tau)$ – взаимная корреляционная функция; $R_{xx}(\lambda)$ – автокорреляционная функция; τ – временной сдвиг.

Так как $x(t)$ – реальный шум, имеющий равномерный спектр в полосе частот, значительно превышающей полосу пропускания исследуемого объекта, то можно заменить автокорреляционную функцию шума в выражении (2) импульсной характеристикой – автокорреляционной функцией идеального «белого» шума $\alpha\delta(\lambda)$, где $\delta(\lambda)$ – функция Дирака. Тогда выражение (2) будет иметь вид

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau - \lambda) \alpha\delta(\lambda) d\lambda = \alpha h(\tau), \quad (3)$$

где $h(\tau)$ – импульсная характеристика.



Рис. 2. Структурная схема корреляционного измерителя импульсной характеристики:

$x(t)$ – тестовый шум на входе; $h(t)$ – внешний шум; $y(t)$ – тестовый шум на выходе; $x(t-\tau)$ – исходный тестовый сигнал с учетом задержки по времени; $R(\tau)$ – импульсная характеристика исследуемого объекта;

α – масштабный коэффициент, учитывающий некоторые погрешности системы генерации и приема сигнала

Как следует из выражения (3), взаимная корреляционная функция непосредственно дает выражение для оценки импульсной характеристики $h(\lambda)$. При этом влияние аддитивной компоненты $h(t)$ (внешнего шума), которая не коррелирована с исходным сигналом $x(t)$, оказывается настолько малым, что им можно пренебречь. Заметим, что подобные корреляционные измерения обычно можно выполнять во время нормальной обработки объекта. Снижение случайных помех, свойственное корреляционному методу, позволяет использовать весьма малые испытательные сигналы $x(t)$, не нарушающие по существу нормального режима обработки объекта.

Для получения диагностически значимых признаков состояния обрабатываемой детали можно использовать критерий отклонения импульсной характеристики исследуемого объекта в режиме обработки от оценки $h^*(\tau)$ – критерия минимума расстояния. В качестве критерия отклонения контролируемой импульсной характеристики $h(\tau)$ от оценки $h^*(\tau)$ используется среднеквадратичный критерий различия сигналов [11], определяемый выражением

$$F = \overline{[h(\tau) - h^*(\tau)]^2}, \quad (4)$$

где $h^*(\tau)$ – средняя импульсная характеристика аналогичных деталей, подвергаемых соответствующей обработке при обучении диагности-

ческой системы (черта над величиной означает операцию усреднения по времени).

Таким образом, разработанный корреляционный метод измерения импульсной характеристики обрабатываемой детали [12] позволяет получать результаты измерений высокой точности без прекращения обработки детали, что подчеркивает актуальность проведенного исследования.

Для реализации данного метода использовали генератор исходного тестового сигнала (генератор «белого» шума); приемник выходного сигнала (пьезодатчик с равномерным широкополосным излучателем или конденсаторный микрофон); устройство регистрации и обработки данных (ПК).

По результатам некоторого числа экспериментов система регистрации и обработки данных создает базу данных, содержащую сведения об импульсных характеристиках деталей, классифицированных по материалу, исходному состоянию, режимам обработки и т.п.

Апробация метода

Для проверки эффективности разработанного метода была собрана упрощенная модель, включающая в себя пьезопередатчик, пьезоприемник и ПК, оснащенный надлежащим ПО. Моделирование процесса диагностики проводили

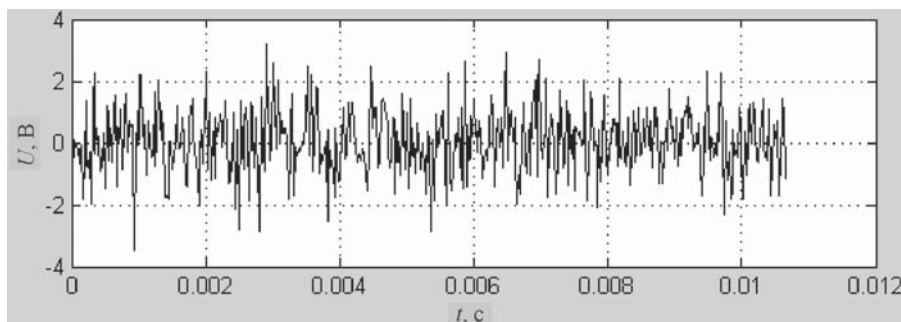


Рис. 3. Тестовый шум

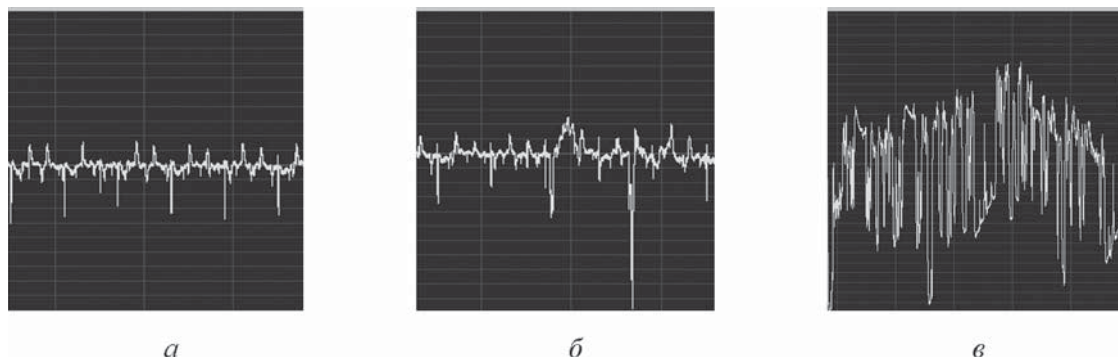


Рис. 4. Шумовые диаграммы исследуемых образцов

в программных пакетах Mathcad, Matlab. В качестве основного пакета моделирования оптимальных алгоритмов распознавания использовали пакет Signal Processing Toolbox.

Суть эксперимента сводится к следующему: тестовый сигнал (рис. 3) – гауссов белый шум – воздействовал на стальные образцы одинаковой конфигурации, но на различных стадиях упрочнения. Полученный сигнал был скоррелирован с исходным, в результате чего были получены импульсные характеристики образцов.

В качестве образцов использовали цилиндрические образцы из легированной стали 12ХН3А трех видов: неупрочненный образец; образец, обработанный в пять проходов роликом из закаленной быстродействующей стали Р6М5 диаметром 40 мм при радиусе дорожки качения 12 мм; переупрочненный образец, обработанный в 20 проходов. Выбор образцов обусловлен данными исследований [13].

Для получения более подробной дислокационной картины необходимо провести дополнительные исследования с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-1,5 и растрового сканирующего туннельного микроскопа ТТМ-2.

Шумовые диаграммы первых двух образцов соответствуют линейному шуму (рис. 4, а, б) а диаграмма третьего (переупрочненного) образца – нелинейному (рис. 4, в). Это свидетельствует о том, что импульсная характеристика детали, полученная в процессе обработки, может иллюстрировать значительные изменения физических и энергетических параметров детали. Соответственно, по этим изменениям можно диагностировать момент максимального упрочнения материала детали – стали. Это полностью подтверждает действенность метода.

Основным условием успешной работы системы диагностики является правильная конфигурация детали. Разработанный алгоритм расчета импульсной характеристики справедлив только для линейного (или квазилинейного) процесса. В других случаях метод корреляции не работает в связи с нелинейностью выходного сигнала.

Таким образом, исследуемый объект должен иметь однородность структурного строения и содержать минимальное число внутренних полостей. На практике в качестве таких объектов могут выступать втулки, оси, посадочные шейки валов и сами валы.

Выбор конфигурации детали требует дополнительных исследований.

Заключение

Разработанный метод позволяет диагностировать и прогнозировать состояние поверхностного слоя обрабатываемых деталей путем исследования импульсных характеристик поверхностного слоя и использования принципов компьютерного распознавания образов. К достоинствам метода относятся доступность и сравнительная универсальность, а также отсутствие влияния системы диагностики на состояние исследуемых объектов. Для осуществления диагностики по разработанному методу (в отличие от широко применяемых стандартных методов) не требуется узкоспециализированного оборудования. Достаточно ПК, оснащенного надлежащим ПО, и доступных акустических преобразователей. К тому же метод позволяет контролировать все однотипные детали обрабатываемой серии, а не только детали контрольной группы. Кроме того, осуществление контроля данным методом проводится без введения дополнительных трудоемких операций в технологический процесс. Применение метода актуально при среднесерийном производстве, связанном с изготовлением более 1000 однотипных деталей (изготовление первых 50 деталей каждого типа является необходимым обучающим циклом для ПО).

Список литературы

1. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
2. Конева Н.А., Лычагин Д.В., Жуковский С.П., Козлов Э.В. Эволюция дислокационной структуры и стадии пластического течения поликристаллического железоникелевого сплава // ФММ. 1985. Т. 60. Вып. 1. С. 171 – 179.
3. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. – 3-е изд., перераб. и доп. В 2 ч. Ч. 1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 27 с.
4. Старков В.К. Дислокационные представления о резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
5. Бутенко В.И. Формирование и изнашивание поверхностного слоя детали. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 193 с.
6. Бутенко В.И. Нелинейность процессов при

- обработке металлов резанием. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2001. – 224 с.
7. Чалмерс Б. Физическое металловедение / пер. с англ. В.А. Алексеева, В.К. Григорovichа. – М.: Металлургиздат, 1963. – 455 с.
 8. Таранов А.С. Повышение эффективности упрочнения поверхности валов при ремонте сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием в переменном магнитном поле: Дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2010. – 442 с.
 9. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: учебное пос. для радиотехнич. специальностей вузов / под ред. В.И. Винокурова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. С. 244 – 247, 289 – 292.
 10. Корн Г. Электронные аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины. – М.: Мир, 1967.
 11. Рубичев Н.А. Оценка и измерение искажений радиосигналов. – М.: Советское радио, 1978.
 12. Галустов Г.Г., Сидько И.В. Оценивание импульсной характеристики линейной системы в рабочем режиме // Телекоммуникации. 2008. № 4. С. 13 – 17.
 13. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 229 с.
- Материал поступил в редакцию 19.03.2012*

СИДЬКО
Иван Владимирович

E-mail: vanja-brokenroll@mail.ru
Тел.: +7(8634) 37-16-26

Кандидат технических наук, доцент кафедры радиоприемных устройств и телевидения Таганрогского технологического института Южного федерального университета. Сфера научных интересов – моделирование диагностических систем с применением встроенного контроля, моделирование и оценка параметров случайных процессов с заданными статистическими характеристиками. Автор 18 научных работ.

ФОМЕНКО
Елена Сергеевна

E-mail: elenka705@gmail.com
Тел.: +7(8634) 37-16-22

Инженер кафедры механики Таганрогского технологического института Южного федерального университета. Сфера научных интересов – технологическая наследственность, упрочняющая обработка металлов, энергетические процессы при механической обработке деталей. Автор 10 статей, пяти патентов на изобретения и полезные модели.