

Список используемых источников

1. Сайфуллин, Р.С. Неорганические композиционные материалы [Текст] / Р.С. Сайфуллин. – М.: Химия, 1983. – 299 с.
2. А.с. 1618778 А1 СССР, МКИ³ С23 С 4/00. Способ получения покрытий [Текст] / А.П. Алхимов, В.Ф. Косырев, Н.И. Нестерович, А.Н. Папырин (СССР). – №4075078/02; заявл. 06.06.86; опубл. 07.01.91, бюл. № 1. – 2с. ил.
3. Tokarev, A.O. Structure of aluminum powder coatings prepared by cold gas dynamic spraying [Текст] / A.O. Tokarev // Met. Sci. Heat Treat. – 1996. – Vol. 35, № 2. – P. 136–139.
4. Полякова, Т.Л. Твердое анодирование крупногабаритных деталей на малогабаритном оборудовании [Текст] / Т.Л. Полякова, С.Н. Юркевич, С.В. Кунашенко. – Журнал «Справочник. Инженерный журнал», 2004, № 6, с. 15–18.

УДК 620.178.15

В.М. Кенько, И.Н. Степанкин

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПОВЕДЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ ДИФфуЗИОННО-УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого
г. Гомель, Беларусь

It is shown that modifying of P6M5 high speed steel surface hardening enables practically to change properties of the layers hardened in order to adapt them to operation modes of a particular kind of machining attachments.

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность деталей машин и технологической оснастки в значительной степени обуславливается структурой и механическими свойствами наружных слоев рабочих поверхностей. В последнее время уделяется большое внимание разработке различных методов модификации материалов с целью формирования специфических свойств в тонком поверхностном слое. Применение высокоэнергетических способов упрочнения на основе лазерных, плазменных и др. технологий требует использования специального оборудования и значительных капиталовложений. В этих условиях существенным преимуществом термодиффузионных методов поверхностного упрочнения является возможность использования стандартного оборудования термических участков. Однако, в настоящее время отсутствует единый подход и методики выбора вида и режимов химико-термической обработки, требуемых свойств модифицированного слоя с учетом условий эксплуатации конкретных изделий и характера их напряженно-деформированного состояния. Нерешенной является проблема адекватного отображения состояния многофазного материала, характеризующегося градиентом свойств по сечению, в условиях

внешнего воздействия на него. Отсутствуют сведения о механических свойствах диффузионно-упрочненных слоев и влиянии на них режимов упрочнения. Нет данных о свойствах структурных составляющих высоколегированных сталей. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на разработку методологии создания упрочненных слоев, адаптированных к условиям эксплуатации конкретных деталей, с учетом структуры и свойств контактирующих материалов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

В качестве объекта исследования выбрана быстрорежущая сталь Р6М5, используемая для изготовления тяжело нагруженной штамповой оснастки.

Модификацию поверхностного слоя быстрорежущей стали осуществляли путем низкотемпературной нитроцементации в среде продуктов диссоциации триэтанолamina при температуре $555 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 8 часов и науглероживанием в среде природного газа в соответствии с рекомендациями изложенными в работе [1].

Для устранения коробления образцов в процессе термической и химико-термической обработок, обеспечения адсорбции азота и углерода, а также заданного теплообмена поверхностей образцов их собирали в жесткие пакеты с зазором 1–2 мм. Рабочая часть образцов имела толщину 0,6 мм. Термообработку образцов после диффузионного насыщения проводили следующим образом: закалка с температуры 1200°C с охлаждением в масле и трехкратный отпуск при температуре 560°C . По окончании термообработки боковые поверхности образцов шлифовали и полировали для структурных исследований и определения модуля упругости путем микроиндентирования. Модуль упругости диффузионно-упрочненных слоев определяли также при растяжении экспериментальных образцов на испытательном стенде «INSTRON».

Так как толщина экспериментальных образцов составляла 0,6 мм и их диффузионное упрочнение происходило с обеих сторон в первом приближении считали, что химический состав образцов по сечению соответствует химическому составу упрочненного слоя. Как видно из рис. 1 микротвёрдость образцов-свидетелей (пластины размерами $5 \times 33 \times 200$), определенная на косом шлифе, у поверхности превысила твердость сердцевины.

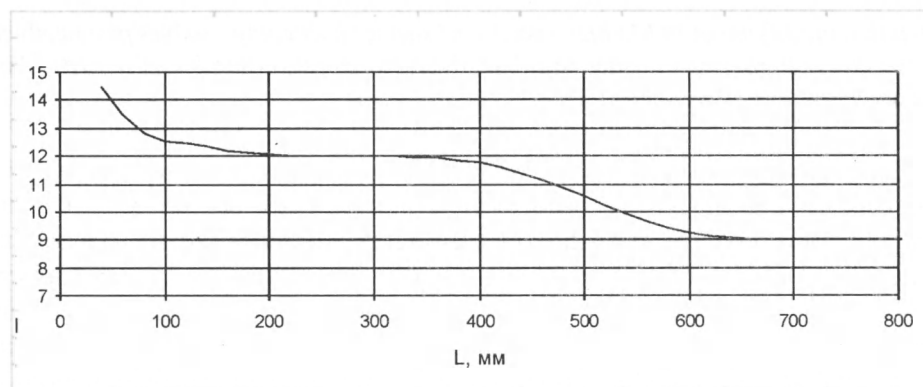


Рис. 1. Распределение микротвёрдости (H_{100}) по сечению карбонитридного слоя: L – расстояние от поверхности

Плавное уменьшение до твёрдости сердцевины в обоих случаях происходило на глубине более чем 0,3 мм. Следовательно, можно считать, что свойства подготовленных образцов близки к свойствам идентичных им упрочненных слоев и равномерно распределены по сечению материала образца.

Микроиндентирование осуществляли на испытательном стенде «INSTRON». В качестве индентора применяли индентор Виккерса.

Линейные размеры образцов в плоскости индентирования значительно превышали величину равную десяти поперечным размерам отпечатка индентора что, по мнению авторов работы [2], является условием для получения корректных данных в результате исследования свойств материала индентированием.

Индентирование проводили путем многократного нагружения образцов. После каждого цикла нагружения делали выдержку длительностью 10 секунд для протекания процессов релаксации, а затем разгружали индентор. Следующий цикл нагружения осуществляли с увеличением нагрузки, не изменяя положения индентора. Скорость нагружения составляла 10 мкм/мин. Начальный цикл нагружения проводили при максимальной нагрузке на индентор – 10 Н. Все последующие циклы нагружения проводили, увеличивая нагрузку на 10 Н.

Результаты исследований и их обсуждение. Определение локального модуля упругости (например, отдельной фазы или тонкого слоя материала) сопряжено со сложностью создания образца для испытания на растяжение. Поэтому, в последнее время, для определения модуля упругости материала ограниченного объема, находящегося в неразрывной связи с другим материалом, пользуются методами вдавливания индентора [2–4].

В основе методов определения модуля упругости посредством индентирования лежат решения задачи Герца об упругом вдавливании шара в полупространство. Изменение формы индентора требует измерения упругого сближения либо площади поверхности контакта между индентором и испытуемым образцом. При этом считается, что характер распределения давления при изменении формы индентора не оказывает существенного влияния на упругую деформацию, а точнее на упругую реакцию испытуемого материала [2]. В этом случае упругое сближение двух контактирующих тел определяется зависимостью 1:

$$w = \frac{mP}{d_u} \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_u^2}{E_u} \right) \quad (1)$$

где $m=1...2$ – показатель распределения давления по площади контакта; d_u – диаметр площади упругого контакта, м; E и E_u – модули упругости, Па и ν , ν_u – коэффициенты Пуассона двух контактирующих материалов, P – нагрузка, Н.

Однако при таком подходе не учитывается пластическая деформация испытуемого материала, характеризующаяся шириной петли гистерезиса, получаемой при разгрузке образца и его повторных нагружениях, что может привести к искажению определяемых величин на 10–20 % от истинных значений [2]. Предложено определять модуль упругости по углу наклона – θ , (рис. 2), ветви разгрузки диаграммы. Многочисленными экспериментами показано, что начальный участок ветви разгрузки линейный и угол наклона θ , образуемый с горизонтальной осью координат не зависит от характера распределения давления по площади пластического отпечатка [2–4].

Линейный характер указанной части кривой

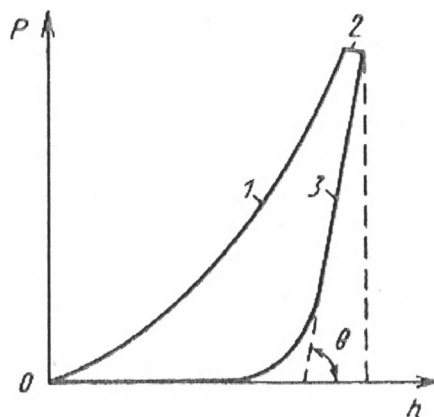


Рис. 2. Диаграмма вдавливания (h – глубина вдавливания, P – сила вдавливания, 1 – нагружение, 2 – выдержка, 3 – разгрузка)

свидетельствует об упругом взаимодействии испытуемого материала и индентора. Для расчета модуля упругости используется следующая зависимость:

$$E = (1 - \nu^2) \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{A_p} \left(\frac{dw}{dP} - \frac{dh_n}{dP} \right) - \frac{1 - \nu_u^2}{E_u} \right]^{-1} \quad (2)$$

где $\sqrt{A_p}$ площадь проекции упругого контакта, зависящая от контактной глубины, формирующейся при внедрении и пластической деформации испытуемого материала.

$$\frac{dh_n}{dP} = \frac{dh_u}{dP} + \frac{dh_o}{dP} \quad (3)$$

– суммарная поправка на податливость, состоящая из податливости измерительного прибора ($\frac{dh_u}{dP}$) и податливости системы индентор-державка ($\frac{dh_o}{dP}$).

Для построения диаграмм в осях нагрузка – перемещение индентора возможно использование любой приборной аппаратуры, обеспечивающей одновременную регистрацию нагрузки, приложенной к индентору, и его перемещения с необходимой точностью.

При расчете модуля упругости по зависимости 2 принимаются постоянными следующие величины: коэффициент Пуассона $\nu=0,07$ и модуль упругости $E=1141$ ГПа алмаза. Используемая в качестве индентора алмазная пирамида образует с державкой линейный размер площади контакта $F^{1/2}=2,3$ мм, а величина, выражающая податливость системы индентор-державка составляет $\frac{dh_o}{dP}=2,2$ нм/Н [2]. Податливость прибора ($\frac{dh_u}{dP}$) является конструктивной характеристикой и для ПМТ-3 равна 2,6 нм/Н.

Следует отметить, что получение кривых в осях нагрузка-перемещение с регистрацией фазы возрастания нагрузки и разгрузки на приборе ПМТ-3 является достаточно трудоемкой задачей и сопряжено с необходимостью оснащения прибора дополнительными регистрирующими устройствами.

Применение атомно-силового микроскопа (например, отечественного производства – НАНОТОП) или наноинденторов-ультратвердомеров (DUN-W201S или Nano Indentor ТМII зарубежного производства) обеспечивает нагружение испытуемого материала нагрузками порядка единиц миллиньютонов. Одновременно с этим указанные приборы обеспечивают разрешение по силе 0,2 мкН и смещения в 0,001 мкм. Получаемые при этом отпечатки весьма малы. Контактная площадь отпечатков значительно меньше отдельных структурных составляющих много фазных материалов, что обеспечивает возможность получения информации о свойствах структурных компонентов составляющих композиционный материал [5–7].

В нашем случае стоит задача определения упругих характеристик довольно развитых диффузионно-упрочненных слоев толщиной от 200 мкм. Структурно, материал диффузионно-упрочненного слоя представляет собой композит на основе α твердого раствора, в котором роль наполнителя выполняют карбиды и карбонитриды. Измеряемый модуль упругости упрочненного слоя является интегральной величиной, значение которой зависит от состава упрочненного слоя и структурных компонентов, сочетания их свойств и размеров. Определение модуля упругости упрочненного слоя путем внедрения индентора Е.С. Берковича на небольшую глубину фактически будет представлять собой случайно чередующиеся испытания трех локальных микрообъемов: собственно металлической матрицы, включений и граничной зоны включение-матрица.

Карбидные частицы в зависимости от размеров и структурно-наследственного происхождения могут, как упрочнять материал (вторичные мелкодисперсные карбиды), так и играть роль концентраторов напряжений (первичные эвтектоидные карбиды).

Размеры отдельных структурных составляющих рассматриваемого упрочненного слоя могут составлять до 20 и более мкм. Так размеры зерна быстрорежущей стали Р6М5 после стандартной термообработки – закалка 1200 °С + трехкратный отпуск 560 °С соответствуют 10 баллу действительного зерна аустенита по ГОСТ 5639, их величина составляет 11 мкм [8]. Размеры отдельных карбидных частиц по нашим данным могут достигать порядка 20 мкм [9]. Учитывая, что эксплуатационные характеристики рассматриваемого упрочненного слоя зависят от всех перечисленных структурных составляющих при испытании следует воспользоваться рекомендациями, изложенными в работе [2] и обеспечить такие режимы индентирования при которых площадь отпечатка будет в несколько раз превышать размеры структурных составляющих материала. Простейший расчет площади зерна при условии, что его форма как правило представляет собой компактный неправильный многогранник условно рассматриваемый как круг диаметром 11 мкм, показали, что выполнение условия будет достигнуто в случае получения отпечатка площадью более 285 мкм² (трехкратное превышение по отношению к площади зерна) что соответствует внедрению четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136°, используемой на приборе ПМТ-3 на глубину более 3,4 мкм. Размеры карбидных включений в данном случае не принимали в расчет, т.к. длина включения достигающая 20 мкм значительно превышает его ширину – 3 мкм [9] и следовательно площадь включения оказывается меньше площади зерна, соответствующего 10 баллу. В качестве оборудования предпочтительно использовать испытательный стенд «Instron». Его чувствительность при регистрации нагрузки составляет 10⁻⁴ Н. В тоже время, нагружающий узел изготовлен из достаточно жестких элементов, так как максимальная нагрузка, развиваемая этим прибором, составляет 30 000 Н. Поэтому, следует ожидать, что при нагрузках порядка 100–200 Н, рекомендуемых при использовании прибора ПМТ-3, конструктивные элементы стенда будут обладать минимальной податливостью. Т.е. при проведении тестовых исследований величину податливости оборудования в первом приближении можно считать равной нулю.

Тестовые испытания системы индентор-оправка стенда «Instron» показали, что участки кривых, характеризующие упруго-пластическое внедрение индентора и упругую отдачу образца однотипны (рис. 3). Следовательно, жесткость нагружающей системы постоянна, что позволяет исключить погрешности, объясняемые изменением жесткости узла нагружения.

Для достижения необходимой точности при определении контактной глубины испытания проводили многократным вдавливанием индентора, не изменяя его положения. В этом случае, в каждом цикле нагружения, контактная глубина рассчитывалась как разность между координатой, полученной при окончании испытания в текущем цикле и координатой индентора определенной, в первом цикле испытаний. Таким образом, дискретное увеличение абсолютного значения контактной глубины при неизменной начальной погрешности будет сопровождаться уменьшением относительной погрешности рассматриваемой величины.

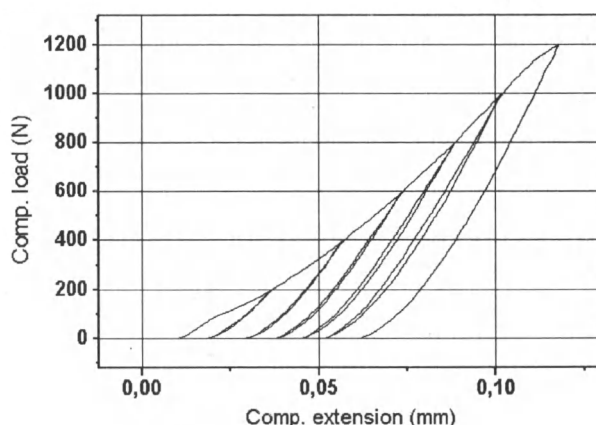


Рис. 3. Кривые упруго-пластического взаимодействия при индентировании тест образца из быстрорежущей стали

Индентирования дискретно возрастающей нагрузкой до величины 110 Н, показали, что форма кривых начиная с кривой, полученной при нагрузке 40 Н, остается однотипной, отличаясь лишь максимальной величиной приложенной нагрузки и глубиной внедрения.

Расчет модуля упругости проведенный по результатам индентирования карбонитридных и карбидных слоев быстрорежущей стали, показал, что величина модуля упругости карбонитридного и карбидного слоев составляет $2,22 \times 10^{11}$ Па и $2,28 \times 10^{11}$ Па соответственно и фактически близки к модулю упругости основного материала, определенного испытанием на растяжение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована возможность использования метода микроиндентирования для определения упругих характеристик упрочненных слоев высоколегированных сталей ледебуритного класса. Экспериментальная оценка модуля упругости карбидных и карбонитридных слоев быстрорежущей стали Р6М5 показала, что диффузионное насыщение не изменяет упругих характеристик поверхностного слоя. Величина модуля упругости карбонитридного и карбидного слоев составляет $2,22 \times 10^{11}$ Па и $2,28 \times 10^{11}$ Па соответственно и фактически равны модулю упругости основного материала, определенного испытанием на растяжение.

Список использованных источников

1. Пат. 4588 ВУ, МПК C23C 8/00. Способ упрочняющей обработки быстрорежущей стали / В.М.Кенько, И.Н.Степанкин, С.Н.Гузов, В.И.Бобиков, В.Ф.Пинчуков, В.М.Выгляд. – № 19980716 А; Заявл. 27.07.1998; Опубл. 30.09.2002 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2002. – № 3.
2. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
3. Булычев С.И. Соотношение между восстановленной и невосстановленной твердостью при испытании наномикроиндентированием // ЖТТ. – 1999. – Т. 69. – вып. 7. – С. 42–48.
4. W.C.Oliver, G.P.Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – v. 7. – № 6. – P. 1564–1575.
5. Сойфер Я.М., Вердян А. Исследование локальных механических свойств монокристаллов хлористого калия методом атомно-силовой микроскопии // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – вып. 11. – С. 1621–1625.
6. Исследование механических свойств тонких пленок Ag на кремниевой подложке методом наноиндентирования // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – вып. 11. – С. 1973–1977.
7. Андриевский Р.А., Калинин Г.В., Hellgren N., Sandstrom P., Штанский Д.В. Наноиндентирование и деформационные характеристики наноструктурных боридонитридных тонких пленок // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42. – вып. 9. – С. 1624–1627.
8. Гуляев А.П. О прочности // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1993. – № 7. – С. 2–6.
9. Кенько В.М., Степанкин И.Н., Столяров А.И. Износостойкость матриц холодновысадочной оснастки // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 3. – С. 402–406.