

Литература

1. Paul Waide, Conrad U. Brunner. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric-Motor-Driven Systems. International Energy Agency Working Paper, Energy Efficiency Series. Paris, 2011.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб. : Питер, 2010. – 350 с.
3. Патент РФ 2076450. МПК: В60 К 17/02; F16H 48/00; H02 K16/02; H02K 7/116. 27.03.1997. Способ регулирования частоты вращения двига-

теля двойного питания и устройство для его осуществления / Мещеряков В.Н.

4. Патент РФ № 2130226. МПК: H02K17/00, H02P 7/00. 10.05.1999. Асинхронный электродвигатель с бесступенчатым регулированием вращения / Касимов Л.Н., Шаньгин Е.С., Насыров В.С.

5. Патент на ПМ РБ № 11770 от 19.02.2018 / Линевиц С.Я., Бусько В.Н. // Устройство для повышения мощности и крутящего момента электродвигателя.

УДК 620.179

ОЦЕНКА РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ МАГНИТНЫМ ПОНДЕРОМОТОРНЫМ МЕТОДОМ

Кутепов А.Ю., Крень А.П., Гнутенко Е.В.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Контроль внутренних напряжений играет важную роль при диагностике технического состояния различных элементов несущих конструкций. Не менее важно оценивать наличие и величину напряжений и для функциональных теплозащитных покрытий, одними из которых являются покрытия из никеля. Данные покрытия наносятся на изделия космической и авиационной техники, машиностроительную продукцию.

При несоблюдении технологического процесса нанесения в покрытиях могут возникать внутренние напряжения, превышающие по величине силы адгезии, что приводит к их отслаиванию. Такая ситуация является недопустимой для деталей и сборочных единиц авиакосмической техники, в связи с чем создание новых надежных методов контроля приобретает первостепенную роль в обеспечении качества и надежности таких изделий.

Одним из методов, позволяющих оценивать качество ферромагнитных покрытий, является магнитный пондеромоторный метод [1]. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в разработке других методов и приборов контроля внутренних напряжений: коэрцитиметров, ультразвуковых дефектоскопов, рентгеновских дифрактометров, пондеромоторный метод не утратил своей значимости благодаря возможности создания на его базе портативных приборов, обладающих высокой точностью измерений. В полученных ранее результатах [2] было показано, что влияние внутренних напряжений на магнитоотрывное усилие K_f тем больше, чем слабее поле магнита, в котором находится никелевый образец. Это говорит о низкой магнитной проницаемости образцов, имеющих внутренние напряжения и большей концентрации поля в отожженных образцах (со снятыми напряжениями).

Данные результаты легли в основу настоящей работы, целью которой являлось исследование возможности контроля внутренних напряжений

в никелевых образцах, подверженных растягивающим одноосным напряжениям.

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы согласно ГОСТ 11701 для их последующих испытаний в разрывной машине (рисунок 1). Вначале для образцов, имеющих различный исходный уровень напряжений, создаваемый термообработкой и прокаткой, определялись величины предела текучести и предела прочности. Далее проводились испытания, представляющие собой циклы растяжения образцов с последующей полной разгрузкой. очередность циклов была установлена таким образом, чтобы максимальная нагрузка (вершина цикла) нарастала с каждым циклом. Схема испытаний представлена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Испытание образцов

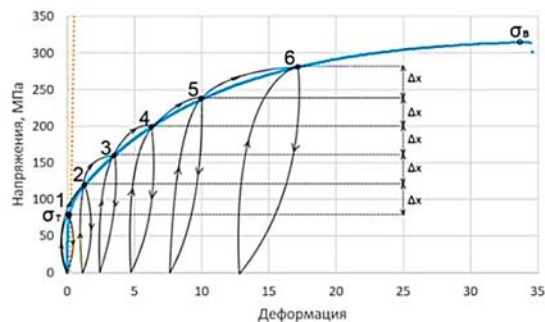


Рисунок 2 – Пример схемы нагружения образца

Измерение магнитоотрывного усилия проводилось в вершинах циклов и на разгрузке. Вершины

циклов были разнесены друг от друга на величину Δx , которая определялась отдельно для образцов с разным начальным уровнем напряжений.

Испытания, проведенные в цикле с нагрузкой, не превышающей значение предела текучести, показали, что величина магнито-отрывного усилия при полном снятии нагрузки принимала исходное значение, что говорит о достоверности проведенных измерений и наличии простой устойчивой связи между величиной K_f и значением растягивающих внутренних напряжений в области упругих деформаций.

В качестве примера на рисунке 4 и 5 показаны зависимости K_f при нагружении упрочненного и отожженного образцов. Для упрочненного образца, в котором внутренние напряжения уже имеют некоторую величину, исходное значение K_f ниже, чем для отожженного (рисунок 4). При этом упрочненный образец деформируется упруго и при разгрузке значения K_f возвращаются к исходным. При растяжении отожженного образца с момента превышения напряжениями значения предела текучести значения K_f после полной разгрузки имеют новую величину, что говорит о создании в образце дополнительных внутренних напряжений, вызванных пластической деформацией.

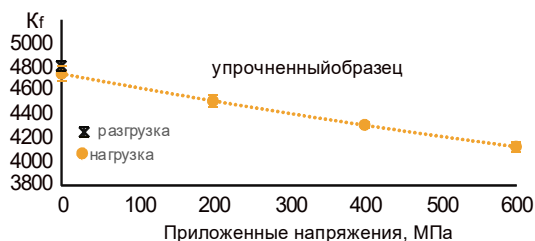


Рисунок 4 – Изменение магнитоотрывного усилия для образца с исходным высоким уровнем внутренних напряжений

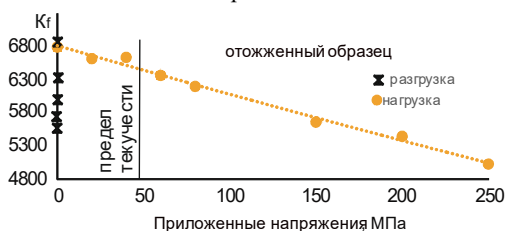


Рисунок 5 – Изменение магнитоотрывного усилия для отожженного образца (со снятыми внутренними напряжениями)

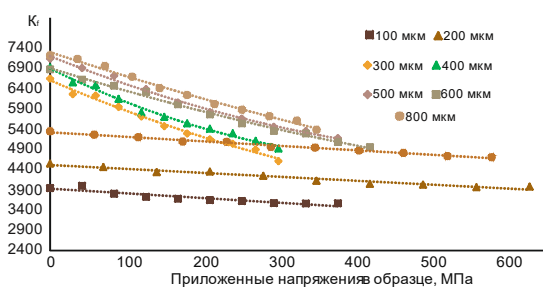


Рисунок 6 – Изменение K_f при нагружении образцов различной толщины

Испытания, проведенные на большом количестве образцов с разной толщиной (до 800 мкм) подтвердили указанную зависимость (рисунок 6). Начальное значение результатов измерений зависит от исходного уровня напряжений в образцах и толщины образцов, а их наклон является близким и меняется незначительно от наличия примесей и значительно от степени упрочнения.

Полученные данные позволяют говорить о том, что для получения градуировочных зависимостей, связывающих K_f и действующие напряжения, необходимо знать две дополнительных параметра: толщину образца и исходный уровень внутренних напряжений. Оценить влияние этих двух факторов на характер зависимости можно, если провести дополнительные испытания, для чего необходимо изготовить образцы и отжечь их с целью полного снятия напряжений.

Далее, проводя растяжение образцов до заданного уровня приложенных напряжений σ_m , тем самым создавая одинаковый уровень внутренних напряжений в материале. Определяя величину K_f для действующих напряжений в диапазоне $0-\sigma_m$ для различных σ_m можно получить кривые с разным наклоном и начальным значением результатов измерений для образца известной толщины с заданным уровнем внутренних напряжений.

Для построения градуировочных зависимостей отдельно для приложенных и внутренних напряжений необходимо проведение дополнительных исследований, которые позволят связать значение магнитоотрывного усилия K_f , магнитной проницаемости k , толщины образцов h и величины приложенных σ и внутренних напряжений σ_i в образцах. В качестве основы для этого может служить известное уравнение для k [3]:

$$k = \frac{2\mu_0 J_s^2}{9\lambda_s \sigma_i} \left[1 - \frac{\sigma}{5\sigma_i} \right]$$

где μ_0 – магнитная постоянная, J_s – намагниченность, λ_s – коэффициент магнитострикции.

Таким образом, в работе показано, что внутренние напряжения оказывают существенное влияние на значение магнитоотрывного усилия K_f . Установлен характер изменения K_f при приложении к никелевым образцам растягивающих напряжений, характерных для гальванических никелевых покрытий. Определены направления дальнейшего развития метода: разделение влияния приложенных и внутренних напряжений на величину K_f .

Литература

1. Калошин В.А., Рудницкий В.А., Гнутенко Е.В., Крень А.П. Исследование и адаптация электромагнитного метода к определению толщины металлокерамических покрытий // Труды ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко» том 32, 2016. – С. 167–177.
2. Рудницкий В.А., Гнутенко Е.В., Крень А.П. Определение толщины двухслойных ни-

кель-хромовых покрытий магнитным методом // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 34–39.

3. С.В. Вонсовский и Я.С. Шур. Ферромагнетизм, Гос. изд-во тех.-теор. лит-ры, М. – Л., 1948. – 816 с.

УДК 620.178

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ

Крень А.П., Ланцман Г.А., Рудницкий В.А.

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Предел текучести σ_T является одной из механических величин, измерение которой обязательно при проведении технического диагностирования потенциально опасного промышленного оборудования: трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, изделий машиностроения и др. В большинстве случаев для определения величины σ_T используются специальные образцы, заготовки для изготовления которых вырезаются из основного металла (или сварного соединения). В дальнейшем данные образцы разрушаются на испытательных машинах для получения диаграммы растяжения и расчета значения σ_T . При этом в зависимости от характера деформирования определяют физический или условный предел текучести, но не разделяют эти понятия при проведении прочностных расчетов, называя оба из них просто пределом текучести. Неизбежное повреждение металла изделия требует впоследствии расходов на проведение ремонта, а изготовление образцов также является довольно затратным по времени процессом. В этой связи, проведение исследований по созданию неразрушающего метода контроля предела текучести является актуальным направлением для промышленности.

В данной работе рассматривается возможность неразрушающего контроля предела текучести сталей, основанная на обработке данных диаграммы динамического вдавливания сферического индентора в испытуемый материал. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование части диаграммы ударного вдавливания, охватывающей две стадии: чисто упругое и упругопластическое деформирование.

В настоящей работе предлагается подход, заключающийся в определении σ_T для некоторой заданной остаточной деформации, при которой в материале создаются пластические деформации, близкие к $\varepsilon = 0,002$ (0,2 %), соответствующей условному пределу текучести при растяжении для материалов без выраженной площадки текучести. В этом случае результат определения σ_T практически не будет зависеть от коэффициента деформационного упрочнения n .

Рассмотрено использование этого подхода при условии использования динамических диа-

грамм внедрения индентора в металл. Как правило, в записываемых диаграммах вдавливания, в координатах «контактное усилие F – глубина внедрения h » (рисунок 1), стадия чистой упругой деформации занимает очень малую часть в общей деформации, и выделить ее из получаемых зависимостей очень сложно.

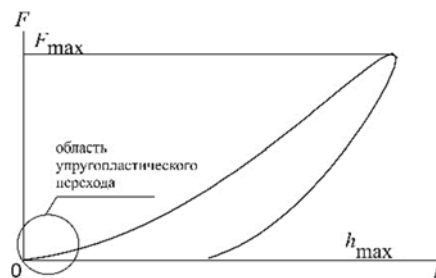


Рисунок 1 – Типичная диаграмма вдавливания

Возможность точной регистрации упругопластического перехода повышается, если следовать результатам работ [1, 2], где было установлено, что, хотя начало пластического течения имеет место при $P_m/\sigma_T = 1,07$ (P_m – среднее контактное давление), практическое проявление пластической деформации происходит при $P_m/\sigma_T = 1,6$. Если воспользоваться зависимостью $\frac{P_m}{\sigma_T} = f\left(\frac{E^* d_c}{\sigma_T D}\right)$, приведенной в [3], и формулой (1), то для значений $E^*/\sigma_T = 250 \div 500$, эта величина будет соответствовать приближительному значению деформации $0,2 \div 0,6$ %. При этом, как показано в [2] использование значения 1,6 вместо 1,07 дает погрешность в оценке предела текучести материалов от -3,1 до +3,3 % от справочного значения σ_T .

$$\varepsilon = 0,2 \frac{d_c}{D} \quad (1)$$

Данные результаты говорят о том, что диапазон, в котором реально может фиксироваться переход от упругой к упругопластической деформации при индентировании может быть расширен, поскольку начальная стадия микропластичности практически не будет оказывать влияния на процесс движения индентора, а значит и на диаграмму вдавливания. Поэтому для расчета σ_T оценивалось среднее контактное давление для точки диаграммы, где $d_c/D = 0,03$ ($\varepsilon = 0,6$ %):

$$P_m = 4F / (\pi d_c^2) \quad (2)$$