

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 620.179
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-167-181>

Поступила в редакцию 23.12.2021
Received 23.12.2021

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

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕ
МАГНИТНЫМ ПОНДЕРОМОТОРНЫМ МЕТОДОМ**

Аннотация. Рассмотрена методика оценки механических напряжений в покрытиях магнитным пондеромоторным методом, основанная на использовании данных о величине магнитоотрывного усилия и его связи с магнитными характеристиками никеля (магнитной восприимчивостью), изменяющимися под действием напряжений. Показано, что существующее оборудование для определения механических напряжений рентгеновским, магнитным или ультразвуковым методами контроля имеет ограничения по размеру для контролируемых образцов либо низкую локальность измерений. Представлен магнитный пондеромоторный метод контроля механических напряжений, не имеющий указанных недостатков. Теоретически обосновано изменение магнитоотрывного усилия от толщины, приложенных и остаточных напряжений, обусловленных упругими и пластическими деформациями в образце. Показано, что наличие в образце остаточных напряжений изменяет характер зависимости магнитоотрывного усилия от приложенных напряжений. Разработан алгоритм расчета, позволяющий по одному измерению магнитоотрывного усилия получить соотношение между величинами приложенных и остаточных напряжений. Показано, что соотношение между остаточными и приложенными напряжениями может быть использовано для оценки степени приближения к критическим значениям напряжений, приводящим к разрушению. Построены градуировочные поверхности зависимости приложенных напряжений от магнитоотрывного усилия и толщины, соответствующие упругопластической деформации, а также уровневые градуировочные поверхности, соответствующие упругой деформации при наличии в материале остаточных напряжений. Выполнены эксперименты на никелевых образцах и покрытиях по оценке приближения механических напряжений в материале к критическим уровням, приводящим к разрушению. Показано, что при сравнении показаний градуированных датчиков с аттестованным средством наибольшее отклонение происходит при малых величинах напряжений вследствие обратной зависимости отрывного усилия от уровня напряжений.

Ключевые слова: никель, пластические деформации, остаточные напряжения, приложенные напряжения, магнитоотрывное усилие, пондеромоторный метод

Для цитирования: Кутепов, А. Ю. Возможность оценки механических напряжений в никеле магнитным пондеромоторным методом / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень, Е. В. Гнутенко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №2. – С. 167–181. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-167-181>

Ales Yu. Kutepov, Alexander P. Kren, Egor V. Gnutenko

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**POSSIBILITY OF ESTIMATION OF MECHANICAL STRESSES IN NICKEL BY THE MAGNETIC
PONDEROMOTIVE METHOD**

Abstract. The paper considers a technique for assessing mechanical stresses in coatings by the magnetic ponderomotive method, based on the use of the magnitude of the magnet breakaway force and its relation to the magnetic characteristics of nickel (magnetic susceptibility), which change under the action of internal stresses. It is shown that the existing mechanical stress measuring equipment using X-ray, magnetic or ultrasonic methods have specimen size limitations or have low measurement locality. At the same time, a magnetic ponderomotive method for controlling mechanical stresses is presented, which

does not have the indicated disadvantages. The change in the magnetic breakaway force on the thickness, applied and residual stresses caused by elastic and plastic deformations in the sample is theoretically substantiated. It is shown that the presence of residual stresses in the sample changes the nature of the dependence of the magnet breakaway force on the applied stresses. A calculation algorithm has been developed that allows measuring the magnet breakaway force to obtain the ratio between the applied and residual stresses. It is shown that the ratio between residual and applied stresses can be used to assess the degree of proximity to the critical stresses levels that lead to failure. Calibration surfaces are constructed for the dependence of applied stresses on magnetic separation force and thickness, corresponding to elastic-plastic deformation, as well as leveled calibration surfaces, corresponding to elastic deformation in the presence of residual stresses in the material. Experiments have been carried out on real samples and coatings, that determine the degree of approximation of internal stresses in the material to critical levels that may lead to destruction. It is shown that when comparing the readings of calibrated gauges with a certified tool, the largest deviation occurs at low stress values due to the inverse dependence of the breakaway force on the stress level.

Keywords: nickel, plastic deformation, residual stress, applied stress, magnet breakaway force, ponderomotive method

For citation: Kutepov A. Yu., Kren A. P., Gnutenko E. V. Possibility of estimation of mechanical stresses in nickel by the magnetic ponderomotive method. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 167–181 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-167-181>

Введение. Определение величины напряжений является важным аспектом контроля качества функциональных теплозащитных никелевых покрытий. Такие покрытия часто применяются в авиационной и космической технике для защиты изделий, подвергающихся интенсивным температурным и силовым воздействиям: камер сгорания, лопаток турбин и др. Высокий исходный уровень напряжений, вызванный нарушением технологического процесса их нанесения, может привести к растрескиванию и отслаиванию покрытий, что в свою очередь может нарушить работоспособность всего изделия и привести к аварийной ситуации.

Существует ряд методов определения механических напряжений: рентгеновский, магнитный, ультразвуковой и др. [1–10]. Однако, оборудование, которое их реализует, как правило, позволяет проводить контроль только на специальных образцах (либо небольших изделиях) или не обладает достаточной локальностью измерений. Одним из методов, который может быть использован для целей оценки механических напряжений в покрытиях, является магнитный пондеромоторный метод [11], развиваемый в Институте прикладной физики НАН Беларуси [12]. Данный метод обладает высокой локальностью измерений с информативной зоной до 25 мм² и позволяет создавать портативные малогабаритные измерительные устройства.

Метод заключается в воздействии на объект полем постоянного магнита и регистрации усилия отрыва магнита от исследуемой поверхности. Величина отрывного усилия K_f несет информацию о толщине и магнитных характеристиках покрытия (например, магнитной проницаемости), на которые оказывают влияние механические напряжения [3, 13].

Цель работы – изучение возможности определения механических напряжений в никелевых образцах (имитациях покрытий на ферромагнитных основаниях) магнитным пондеромоторным методом с учетом изменения толщины покрытия h и исходного уровня напряжений, вызванного пластическими деформациями.

Методика проведения исследований. Во избежание неоднозначности трактовки обозначим контекст применения основных терминов и определений, которые используются в работе. Приложенные растягивающие одноосные напряжения $\sigma_{\text{прил}}$ – напряжения, сформированные под действием внешних сил (макронапряжения). Эти напряжения также называют внешними, и они полностью исчезают при снятии нагрузки. Известно, что остаточные напряжения классифицируются следующим образом: остаточные макронапряжения (I рода) и остаточные микронапряжения (II и III рода). Рассмотренные в статье остаточные напряжения $\sigma_{\text{ост}}$ сформированы при одноосной упругопластической деформации и являются микронапряжениями. Они остаются в материале после снятия внешней нагрузки и также называются внутренними напряжениями [14, с. 5].

Для оценки возможности использования существующих теоретических основ и разработки алгоритма, позволяющего оценить механические напряжения в покрытиях магнитным пондеромоторным методом, были проведены соответствующие эксперименты. Эти работы позволили получить необходимый объем данных и выполнить их последующую теоретическую интерпретацию и адаптацию непосредственно к используемому методу для нахождения корреляционной связи между K_f и искомой характеристикой – механическими напряжениями.

В качестве имитаторов покрытий был использован никелевый прокат разной толщины h марки НПО. Поскольку для никелевых гальванических покрытий характерны растягивающие напряжения [15, 16], то приложенные напряжения $\sigma_{\text{прил}}$ создавались путем растяжения на разрывной машине образцов, изготовленных согласно ГОСТ 11701 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент». Образцы имели разные исходные толщины h (100, 200, 400, 500, 800 мкм) и шероховатость $Ra0,8$. Для снятия исходных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$, созданных при прокатке и изготовлении образцов, была проведена их термическая обработка в виде отжига при температуре 850 °С на протяжении 2 ч в вакуумной печи.

Измерения на разрывной машине проводились с регистрацией изменения поперечного сечения образца и делились на два вида: 1) предварительные, при которых устанавливались физико-механические свойства образцов (физический предел текучести σ_T и временное сопротивление σ_B), и 2) основные, при которых проводилось нагружение образцов и измерение магнитоотрывного усилия K_f с помощью прибора НТ-800, представленного на рис. 1. Отличительной особенностью прибора является возможность подключения как датчиков для контроля толщины, схожих с магнитными толщиномерами Акулова (а. с. СССР № 185495 «Магнитный толщиномер», автор – Н. С. Акулов), так и датчиков для оценки напряжений. Как показали исследования [3, 17], оптимальная с точки зрения контроля напряжений индукция магнитного поля B находится в пределах от 15 до 100 мТл. В работе при выполнении исследований $B \approx 25$ мТл.

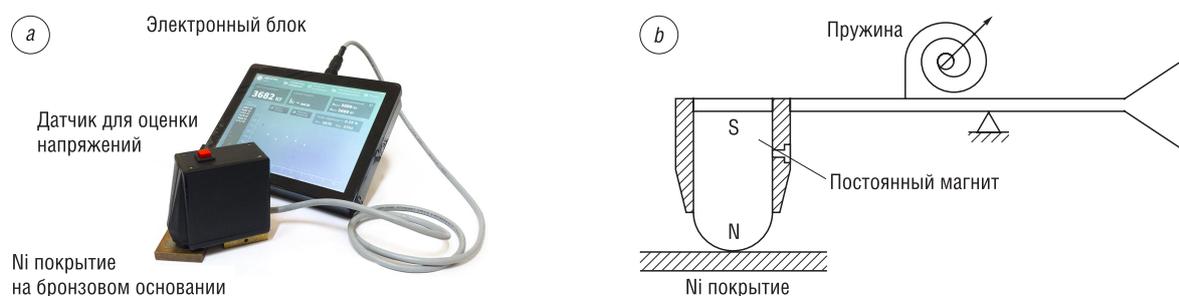


Рис. 1. Внешний вид прибора НТ-800 для измерения K_f (a) и схема реализации его датчика (b)
 Fig. 1. NT-800 device dedicated to measuring K_f (magnet breakaway force) appearance (a) and its sensor schematic (b)

Последовательность приложения и снятия нагрузки к образцам показана на рис. 2. При основных испытаниях проводились измерения K_f в зависимости от приложенных напряжений $\sigma_{\text{прил}}$ на циклах нагружения и разгрузки. Для каждого цикла проводилось нагружение образцов для формирования определенного максимального для этого цикла значения $\sigma_{\text{прил}}$. Это значение соответствовало вершине цикла и обозначалось как $\sigma_{\text{верш}}$ (рис. 2). Далее производилась ступенчатая разгрузка и последующее повторное ступенчатое нагружение. Поскольку перед началом цикла нагружение проводилось до значения $\sigma_{\text{верш}}$, образец был подвержен пластическим деформациям. В процессе деформирования в образце возникали напряжения $\sigma_{\text{ост}}$, отличные от нулевого уровня, сформировавшегося после отжига. Обусловленный нагружением до вершины цикла уровень остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ сохранялся и при полной разгрузке. Пример цикла представлен на рис. 2.

В ходе испытаний каждый образец подвергался нагружению до пяти разных $\sigma_{\text{верш}}$ (по возрастанию) и для каждого значения $\sigma_{\text{верш}}$ осуществлялся цикл «разгрузка-нагружение» (см. рис. 2). Для первого цикла $\sigma_{\text{прил}} = \sigma_{\text{верш}} = \sigma_T = 80$ МПа, последующие $\sigma_{\text{верш}}$ выбирались таким образом, чтобы они располагались на равном удалении друг от друга Δx в диапазоне от σ_T до $0,95\sigma_B$ при $\sigma_B = 315$ МПа. Промежуточные значения напряжений внутри циклов выбирались таким образом, чтобы от каждой вершины цикла $\sigma_{\text{верш}}$ до нуля, точки располагались на равном удалении друг от друга Δy , одинаковом для разгрузки и нагружения. Δy определялись отдельно для каждого цикла нагружения-разгрузки. Величина K_f фиксировалась как среднее серии измерений в каждой точке цикла с фиксацией соответствующих значений приложенных напряжений $\sigma_{\text{прил}}$, регистрируемых разрывной машиной. Статистическая обработка данных проводилась автоматически прибором НТ-800 с использованием критерия Граббса.

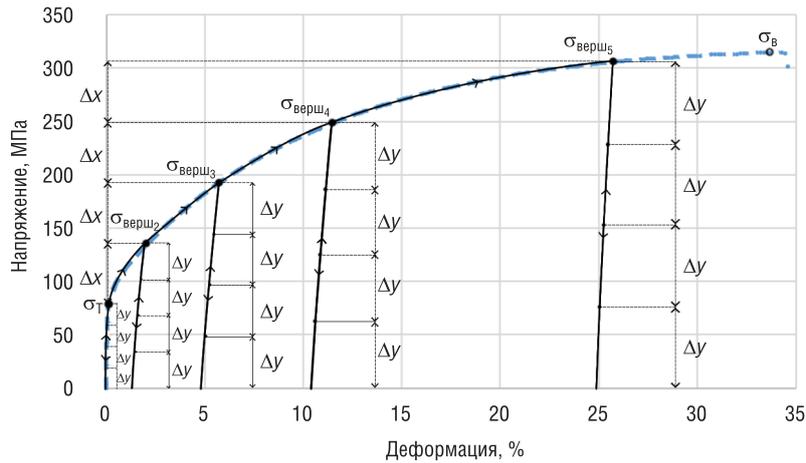


Рис. 2. Пример циклов нагружения, схема расположения точек контроля и очередность циклов на диаграмме условные напряжения-деформация

Fig. 2. An example of loading cycles, a scheme of test spots placement and cycles queue on an engineering stress-deformation plot

Экспериментальные данные и их обсуждение. На рис. 3 показан типичный пример изменения K_f для образца при его циклическом нагружении согласно схеме, представленной на рис. 2. Измерение K_f не только в вершинах циклов, но и в промежуточных точках, отстоящих друг от друга на Δy , позволило установить характерные закономерности. После пересчета напряжений из условных в истинные на участке, где $\sigma_{\text{прил}}$ принимают значения от 0 до σ_T , изменение K_f происходит по линии цикла 1 (рис. 3). Значения K_f при нагружении равны K_f при разгрузке для одинаковых $\sigma_{\text{прил}}$, а $\sigma_{\text{ост}} = 0$. При дальнейшем увеличении прикладываемых напряжений $\sigma_{\text{прил}} > \sigma_T$ до вершины цикла 2 величины K_f при первичном нагружении до вершины цикла и в цикле для одинаковых $\sigma_{\text{прил}}$ не совпадают.

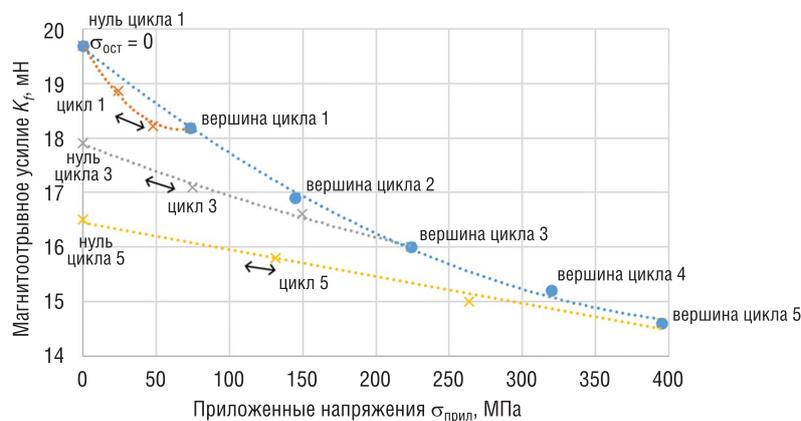


Рис. 3. Изменение K_f от $\sigma_{\text{прил}}$ в вершинах циклов и их промежуточных точках при разгрузке и повторном нагружении для никелевого образца с исходной толщиной 400 мкм

Fig. 3. K_f variation from $\sigma_{\text{прил}}$ (applied stressed) in cycles heights and their intermediate spots during unload and second load for a nickel specimen with a starting width of 400 μm

При измерении K_f после снятия нагрузки заметно значительное снижение его величины относительно нуля первого цикла. Такой характер изменения K_f обусловлен возникновением и ростом пластических деформаций в никеле и формированием $\sigma_{\text{ост}}$, которые сохраняются в образце при его последующей разгрузке и нагрузке в цикле.

Снижение значения K_f происходит для нуля каждого последующего цикла. На рис. 3 представлен конкретный пример изменения K_f при деформировании никелевого образца с исход-

ной начальной толщиной 400 мкм. Стрелками показан характер изменения K_f в процессе приложения и снятия нагрузки. Как видно из рисунка, если до нагружения образца значение $K_f = 19,8$ мН (нуль цикла 1), то при нагружении до $\sigma_{\text{верш}} = 220$ МПа $K_f = 16,0$ мН (вершина 3 цикла), а при последующей разгрузке $K_f = 17,9$ мН (нуль цикла 3). Если дальше нагружать образец до $0,95\sigma_b = 395$ МПа (вершина цикла 5), то $K_f = 14,5$ мН, а при последующей разгрузке $K_f = 16,5$ мН (нуль цикла 5). При этом разгрузка и последующее нагружение образца в рамках одного цикла представляют собой исключительно упругое деформирование, а пластические деформации в образце формируются при нагружении по кривой, которая проходит через значения напряжений $\sigma_{\text{верш}}$, достигаемых в вершинах циклов. Поэтому ход зависимости $K_f = f(\sigma_{\text{прил}})$ на этапах разгрузка-нагружение внутри цикла не совпадает с зависимостью $K_f = f(\sigma_{\text{верш}})$, построенной исходя из соответствующих значений в вершинах циклов, на которую влияют как приложенные напряжения, так и напряжения, формирующиеся в процессе пластической деформации.

Из полученных данных следует, что по отрывному усилию можно оценивать степень приближения к критическим значениям напряжений, которые складываются из остаточных и приложенных. В реальном изделии соотношение приложенных и остаточных напряжений неизвестно. Эти результаты не противоречат полученным ранее [18], существенно их дополняют и позволяют выполнить определенный анализ.

Построенные зависимости (см. рис. 3) дают представление о влиянии $\sigma_{\text{прил}}$ и $\sigma_{\text{ост}}$ на K_f , но не позволяют разделить их вклад. Как видно из рис. 3, одному и тому же значению K_f могут соответствовать разные напряженно-деформированные состояния образца. Например, отрывное усилие в 18 мН соответствует приблизительно как состоянию нагрузки до вершины цикла 1, так и полной разгрузке образца после приложения к нему растягивающего усилия $\sigma_{\text{верш}}$ в цикле 3, а также другим промежуточным состояниям. Если при проведении экспериментов заранее известно, что в образце действуют $\sigma_{\text{прил}}$ и до каких максимальных значений напряжений $\sigma_{\text{прил}} = \sigma_{\text{верш}}$ нагружался образец, то в случае с реальными изделиями, такая информация отсутствует.

Зависимости, аналогичные показанным на рис. 3, были получены и для образцов с другой исходной толщиной в диапазоне 200–800 мкм. При увеличении толщины магнитоотрывное усилие росло, при уменьшении толщины наблюдалась обратная картина.

Таким образом, на K_f влияют как напряжения, так и толщина покрытия. Получение значений K_f и $\sigma_{\text{прил}}$ в вершинах циклов ($\sigma_{\text{верш}}$) для разных h (с учетом ее уменьшения на этапе растяжения образца) позволило установить характер зависимости, связывающей K_f , h и $\sigma_{\text{верш}}$ (рис. 4). Расхождение между истинным значением (т. е. данными, которые аппроксимировались) и значением, рассчитанным аппроксимирующей функцией, выраженное в процентах (далее невязка), для функции $\sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$ не превышало 10 %.

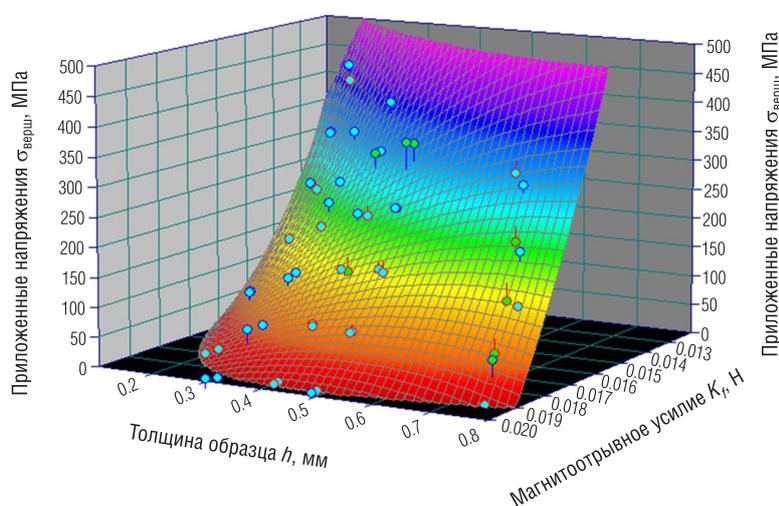


Рис. 4. Поверхность $\sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$
 Fig. 4. Surface $\sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$

Если считать, что действующие в образце из никеля напряжения – это максимальные напряжения, которым он подвергался, то градуировочная поверхность $\sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$, представленная на рис. 4, позволяет определить эти напряжения. Для этого необходимо измерить текущую толщину и магнитоотрывное усилие и по соответствующему уравнению поверхности рассчитать значение $\sigma_{\text{прил}} = \sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$.

В противном случае на K_f будут оказывать влияние уже не только $\sigma_{\text{прил}}$, но и $\sigma_{\text{ост}}$, соотношение между которыми неизвестно. Естественно, что по значению K_f нельзя получить точные значения двух параметров $\sigma_{\text{прил}}$ и $\sigma_{\text{ост}}$. Использование теоретических положений, изложенных далее в статье, дает возможность определить диапазоны изменения значений $\sigma_{\text{прил}}$ и $\sigma_{\text{ост}}$. При этом максимальным значением $\sigma_{\text{прил}}$, принадлежащим диапазону возможных значений, будет являться $\sigma_{\text{верш}}$.

Теоретическое обоснование контроля механических напряжений магнитным полдекомоторным методом. Для получения соотношения между $\sigma_{\text{ост}}$ и $\sigma_{\text{прил}}$ рассмотрим характер изменения K_f при нагружении образца с некоторой исходной толщиной h . На рис. 5 показан пример значения $K_f = K_{f_min}$, которое может соответствовать многочисленным сочетаниям $\sigma_{\text{ост}}$ и $\sigma_{\text{прил}}$. Если предположить, что измеренное значение K_f соответствует точке A , то это означает, что $\sigma_{\text{прил}}$ принимают максимально возможные значения, равные $\sigma_{\text{верш}1}$, и попадают на кривую вершин циклов. При этом сформировавшиеся при пластическом деформировании $\sigma_{\text{ост}}$ для этого случая минимальны, обусловлены нагружением материала до уровня $\sigma_{\text{верш}1}$. При снятии приложенных напряжений, имевшихся в точке A , магнитоотрывное усилие вырастет до $K_f = K_{f_max}$ и будет обусловлено только минимальными остаточными напряжениями $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\text{ост}}^{\text{min}}$ (точка D). Также, измеренное значение $K_f = K_{f_min}$ может соответствовать точке C , в которой $\sigma_{\text{прил}} = 0$, а имеющиеся $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\text{ост}}^{\text{max}}$ максимальны и обусловлены формированием пластических деформаций при нагружении материала до уровня $\sigma_{\text{верш}2}$ ранее. K_{f_min} может соответствовать и любой произвольной промежуточной точке (например, точке B), в которой величины $\sigma_{\text{прил}}$ и $\sigma_{\text{ост}}$ могут принимать определенные сочетания значений. При этом $\sigma_{\text{прил}} \in (0, \sigma_{\text{верш}})$, а $\sigma_{\text{ост}} \in (\sigma_{\text{ост}}^{\text{min}}, \sigma_{\text{ост}}^{\text{max}})$.

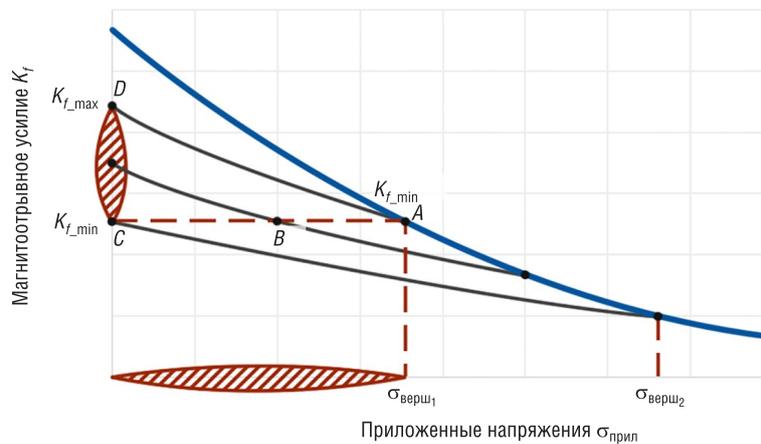


Рис. 5. Диапазоны изменения $\sigma_{\text{прил}}$ и K_f в зависимости от наличия $\sigma_{\text{ост}}$

Fig. 5. $\sigma_{\text{прил}}$ and K_f measurement range with a dependence on a presence of $\sigma_{\text{ост}}$ (residual stressed)

Для того чтобы рассчитать значения $\sigma_{\text{ост}}$, которые были сформированы предварительным нагружением в каждом цикле, воспользуемся уравнением [12], связывающим магнитную восприимчивость материала x с напряжениями:

$$x = \frac{2\mu_0 J_s^2}{9\lambda_s \sigma_i} \left[1 - \frac{\sigma}{5\sigma_i} \right], \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, J_s – намагниченность, λ_s – коэффициент магнитострикции, σ – приложенные (внешние) напряжения, σ_i – остаточные (внутренние) напряжения.

Как сказано в [13], уравнение (1) используется скорее для качественной оценки, чем для количественной, то есть является приближенным. Также выражение (1) справедливо только в случае, когда остаточные напряжения гораздо больше и энергии поля, и внешних растягивающих напряжений. Магнит в датчике, использованном в экспериментах, был подобран так, чтобы соответствовать первому условию. Значения остаточных напряжений были рассчитаны для каждого цикла, поскольку полагалось, что после нагружения образца до вершины цикла формируются пластические деформации и дальнейшая разгрузка и нагружение в цикле исключительно упругие. То есть определение остаточных напряжений возможно в случае отсутствия приложенных напряжений.

Используем уравнение, связывающее магнитоотрывное усилие K_f , толщину h и магнитную восприимчивость материала x [19, 20]:

$$K_f = \frac{c_1 x h}{1 + N x}, \tag{2}$$

где c_1 – размерный коэффициент (устанавливается численно на основании измерений K_f на образцах с известной магнитной восприимчивостью); N – размагничивающий фактор, который может быть определен экспериментально для каждого цикла [21, 22].

Решая совместно (1) и (2), можно получить выражение

$$\frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{5\sigma_{\text{ост}} - \sigma_{\text{прил}}} = \frac{2\mu_0 J_s^2 (c_1 h - K_f N)}{45\lambda_s K_f}.$$

Составив систему уравнений для случая полностью нагруженного состояния $K_f = K_{f_min}$ (точка A) и при разгрузке $K_f = K_{f_max}$ (точка D), получим

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{5\sigma_{\text{ост}} - \sigma_{\text{прил}}} = \frac{2\mu_0 J_s^2 (c_1 h - K_{f_min} N)}{45\lambda_s K_{f_min}} \text{ (под нагрузкой),} \\ \sigma_{\text{ост}} = \frac{2\mu_0 J_s^2 (c_1 h - K_{f_max} N)}{9\lambda_s K_{f_max}} \text{ (в разгруженном состоянии).} \end{cases}$$

С учетом того, что под нагрузкой $\sigma_{\text{прил}} = \sigma_{\text{верш}}$, и решив систему уравнений для $\sigma_{\text{ост}}$, получим выражение

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{\sigma_{\text{верш}} (K_{f_min} K_{f_max} N - K_{f_max} c_1 h)}{5(K_{f_min} c_1 h - K_{f_max} c_1 h)}, \tag{3}$$

где $\sigma_{\text{верш}}$ – величина приложенных напряжений $\sigma_{\text{прил}}$, до которых нагружался образец; K_{f_min} – величина отрывного усилия при нагружении в условиях воздействия на образец приложенных напряжений $\sigma_{\text{верш}}$; K_{f_max} – величина отрывного усилия при разгрузке, то есть когда приложенные напряжения равны нулю, а остаточные напряжения $\sigma_{\text{ост}}$ сформированы при предварительном нагружении до $\sigma_{\text{верш}}$.

N близок к 1 и мало изменяется для покрытия определенной толщины при изменении напряжений в нем. Для упрощения расчетов может быть условно принят за 1, что не внесет значительной погрешности в них. Выражение (3) позволяет установить $\sigma_{\text{ост}}$ по полученным в ходе экспериментов данным по магнитоотрывному усилию K_f и значениям $\sigma_{\text{верш}}$.

Построение градуировочных зависимостей для оценки напряжений пондеромоторным методом. Получив по формуле (3) массив информации о $\sigma_{\text{ост}}$, формирующихся при одноосном нагружении образца до $\sigma_{\text{верш}}$ для каждого цикла каждого образца (разной толщины), можно перейти к построению градуировочных зависимостей для $\sigma_{\text{ост}}$. Однако во время испытаний образца на растяжение его толщина постепенно уменьшается. Для построения градуировочной поверхности для $\sigma_{\text{верш}}$ от K_f (аналогичных показанной на рис. 4) достаточно было учесть только толщину образца, тогда как в случае с $\sigma_{\text{ост}}$ необходимо использовать $\sigma_{\text{прил}}$ и текущее значение h , то есть $\sigma_{\text{ост}}$ является функцией трех переменных $\sigma_{\text{ост}} = f(K_f, h, \sigma_{\text{прил}})$.

Для упрощения получения градуировочных зависимостей для $\sigma_{ост}$, использованы поверхности уровня. Поверхность уровня представляет собой зависимость $\sigma_{прил} = f(K_f, h)$ для отдельной величины $\sigma_{ост}$. При заранее известной величине $\sigma_{прил}$ несколько поверхностей уровня позволяют проводить расчет $\sigma_{ост}$ путем аппроксимации по точкам между ближайшими поверхностями, а в ситуации неизвестного значения $\sigma_{прил}$ – получить диапазоны возможных значений $\sigma_{ост}$ и $\sigma_{прил}$.

Чтобы получить достаточный объем данных, для каждого образца с определенной начальной толщиной для каждого значения $\sigma_{верш}$, то есть для каждого цикла, по формуле (3) были рассчитаны значения $\sigma_{ост}$. Полученный массив информации позволил построить поверхности, описывающие зависимость $\sigma_{прил} = f(K_f, \sigma_{ост})$, без учета в явном виде изменения толщины (рис. 6). При этом на каждом цикле разгрузка-нагрузка $\sigma_{ост} = const$ и текущая толщина $h = const$ (деформации исключительно упругие), а h изменяется при переходе к следующему значению $\sigma_{верш}$ в результате пластического деформирования. То есть каждому значению остаточных напряжений соответствует одно и то же значение толщины.

На рис. 6 видно, что точки данных, по которым строилась вся поверхность, находятся на линиях, для которых $\sigma_{ост} = const$ и $h = const$. Эти линии соответствуют циклам нагружения-разгрузки и заканчиваются пересечением с еще одной линией, для которой $\sigma_{прил} = \sigma_{верш}$. По линиям $\sigma_{прил} = \sigma_{верш}$ для разных образцов и строилась градуировочная поверхность, отображенная на

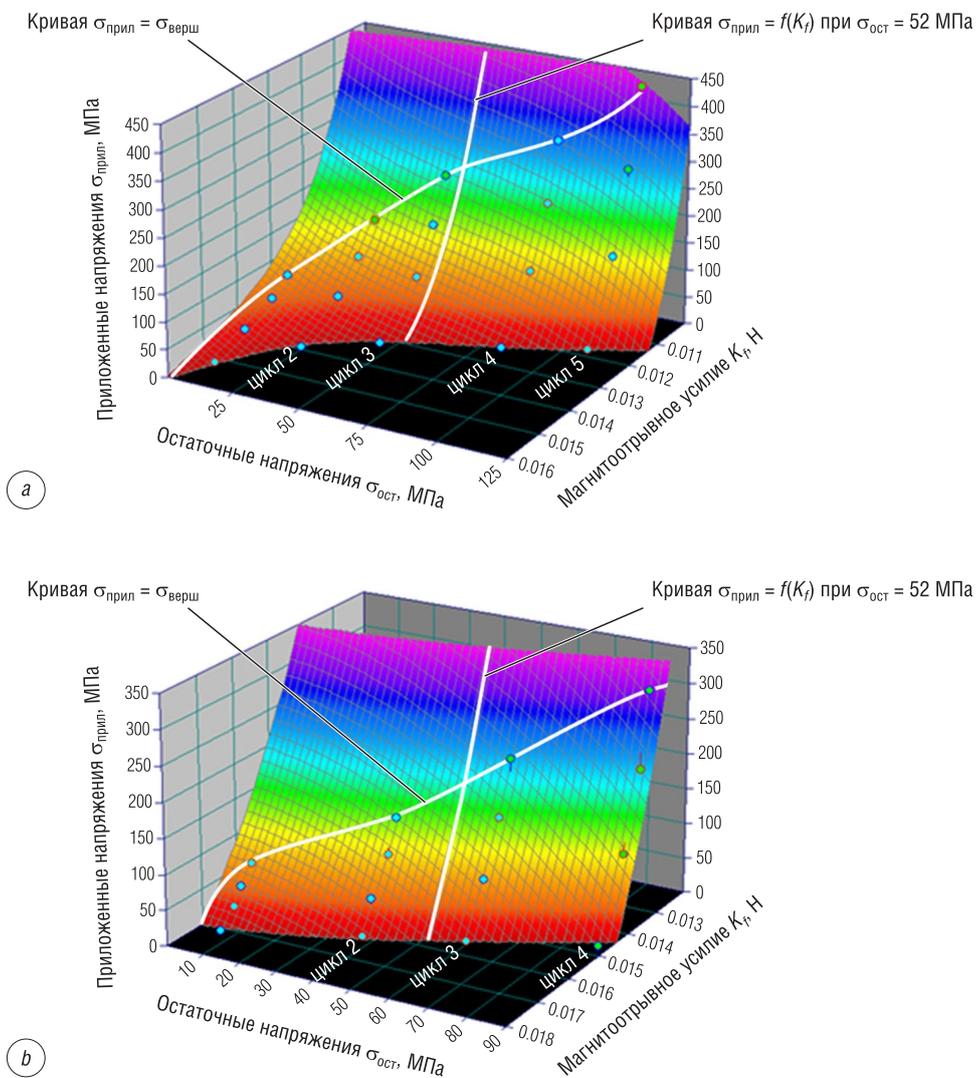


Рис. 6. Пример поверхности $\sigma_{прил} = f(K_f, \sigma_{ост})$ и выделенной на ней кривой $\sigma_{прил,x} = f(K_f)$ при $\sigma_{ост,x} = 52$ МПа для образца с исходной толщиной 200 мкм (a) и 800 мкм (b)

Fig. 6. An example of a $\sigma_{прил} = f(K_f, \sigma_{ост})$ surface and of a highlighted $\sigma_{прил,x} = f(K_f)$ with $\sigma_{ост,x} = 52$ MPa for a specimen with a starting width of 200 μm (a) и 800 μm (b)

рис. 4. Эта градуировочная поверхность ограничивает максимально возможное значение диапазона изменения $\sigma_{\text{прил}}$ таким же образом, как кривая $\sigma_{\text{верш}}$ ограничивает кривые циклов на рис. 3.

Значение h при деформировании образца между вершинами циклов неизвестно. Поэтому для их получения после определения значений $\sigma_{\text{ост}}$ рассчитывались зависимости толщины от остаточных напряжений $h = f(\sigma_{\text{ост}})$ для каждого образца. Эти зависимости в дальнейшем позволили установить толщину при произвольном значении $\sigma_{\text{ост}}$.

Поверхности уровня $\sigma_{\text{прил}_x} = f(K_f, h)$ необходимо построить для разных определенных значений $\sigma_{\text{ост}_x}$. Причем эти значения $\sigma_{\text{ост}_x}$ должны принадлежать как можно большему числу испытываемых образцов (образцов с разной исходной толщиной).

При проведении исследований использовано 10 фиксированных значений $\sigma_{\text{ост}_x}$, рассчитываемых по формуле

$$\sigma_{\text{ост}_x} = x \frac{\sigma_{\text{ост}}^{\text{max}}}{10}, \tag{4}$$

где x – порядковый номер $\sigma_{\text{ост}_x} = \text{const}$ от 1 до 10, для которого находятся значения $\sigma_{\text{прил}_x} = f(K_f)$; $\sigma_{\text{ост}}^{\text{max}}$ – максимальное значение $\sigma_{\text{ост}}$ по всем образцам.

Используя получаемое путем аппроксимации данных уравнение поверхности (рис. 6) $\sigma_{\text{прил}} = f(K_f, \sigma_{\text{ост}})$ при некотором $\sigma_{\text{ост}_x} = \text{const}$, определенным по формуле (4), можно рассчитать значения $\sigma_{\text{прил}_x} = f(K_f)$. Причем каждой кривой $\sigma_{\text{прил}_x} = f(K_f)$ будет соответствовать лишь одно значение толщины образца, что позволяет в дальнейшем учитывать h в градуировочных поверхностях.

Получив массив значений $\sigma_{\text{прил}_x}$, K_f для рассчитанных ранее $\sigma_{\text{ост}_x}$ и имея соответствующие значения h (для разных образцов и для одного образца при деформировании), можно построить соответствующие поверхности уровня (рис. 7) с невязкой до 20 %.

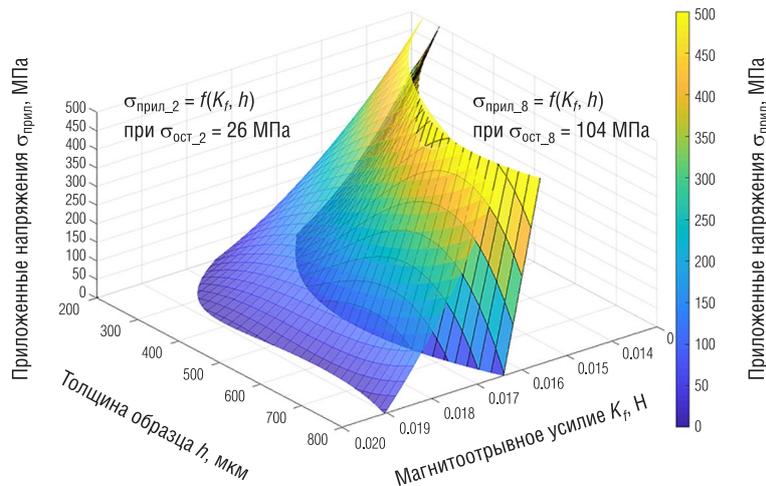


Рис. 7. Поверхность зависимости $\sigma_{\text{прил}_2} = f(K_f, h)$ при $\sigma_{\text{ост}_2} = 26$ МПа и $\sigma_{\text{прил}_8} = f(K_f, h)$ при $\sigma_{\text{ост}_8} = 104$ МПа

Fig. 7. $\sigma_{\text{прил}_2} = f(K_f, h)$ surface with $\sigma_{\text{ост}_2} = 26$ МПа and $\sigma_{\text{прил}_8} = f(K_f, h)$ with $\sigma_{\text{ост}_8} = 104$ МПа

Как уже упоминалось, эти поверхности должны быть ограничены поверхностью, отображенной на рис. 4 (значениями $\sigma_{\text{прил}} = \sigma_{\text{верш}}$). Однако, как можно заметить на рис. 7, полученные поверхности $\sigma_{\text{прил}_x} = f(K_f, h)$ для каждой $\sigma_{\text{ост}_x}$ не имеют ограничений и продолжают за пределами максимальных значений, что не имеет физического смысла. На рис. 8 показано это ограничение – зависимость $\sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$. Она по сути является трехмерным представлением графика, показанного на рис. 3, третьей осью которого выступает ось с отложенными на ней значениями толщины образцов.

Использование методики для измерений на реальных изделиях. Таким образом, имеются все данные, чтобы определить диапазоны изменения приложенных и остаточных напряжений и их соотношение. Определение диапазонов напряжений в никелевом покрытии по полученным градуировочным поверхностям производится путем установления толщины покрытия h и магнитоотрывного

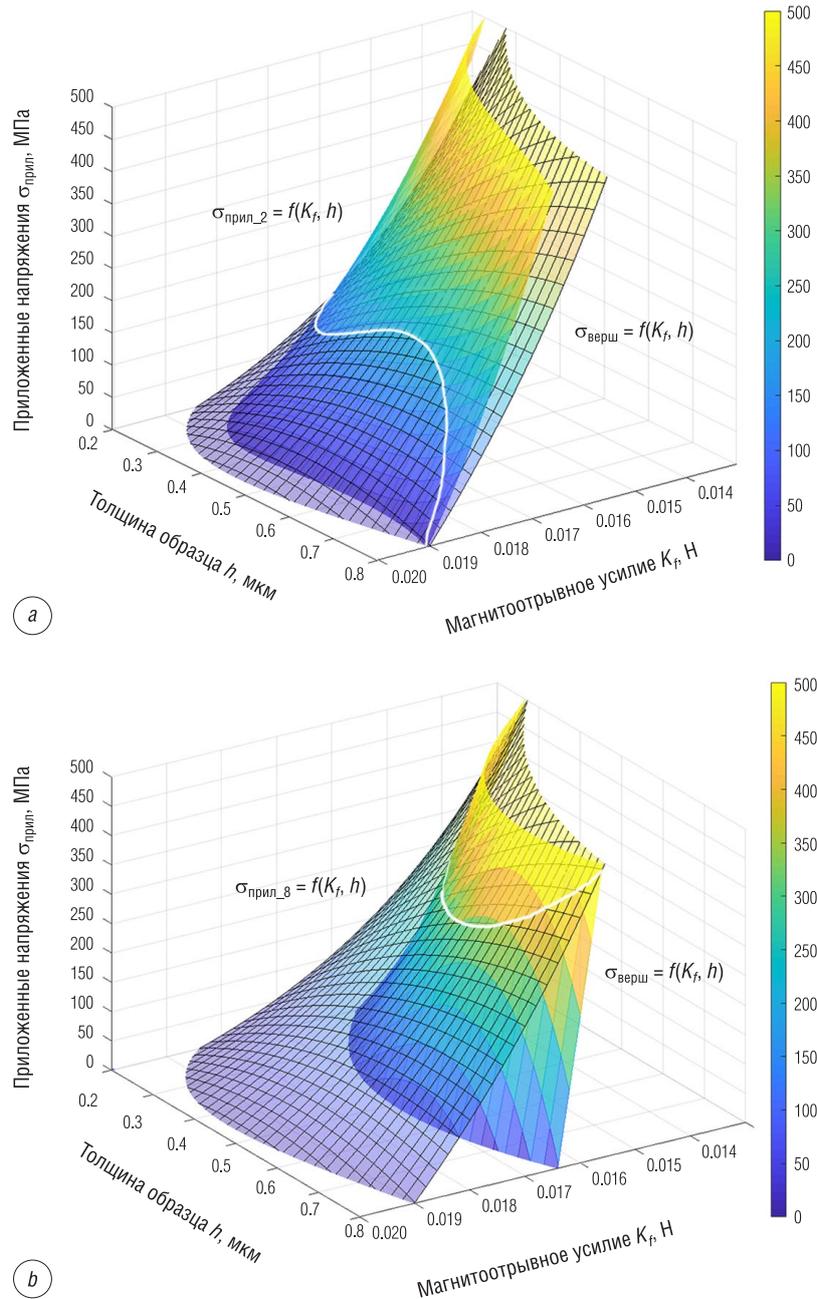


Рис. 8. Пересечение градуировочных поверхностей $\sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$ и $\sigma_{\text{прил}_x} = f(K_f, h)$ для $\sigma_{\text{ост}_2} = 26$ МПа (а) и $\sigma_{\text{ост}_8} = 104$ МПа (б)
 Fig. 8. Intersection of calibration surfaces $\sigma_{\text{верш}} = f(K_f, h)$ and $\sigma_{\text{прил}_x} = f(K_f, h)$ for $\sigma_{\text{ост}_2} = 26$ МПа (а) and $\sigma_{\text{ост}_8} = 104$ МПа (б)

усилия K_f прибором НТ-800 (см. рис. 1, а). По полученным значениям K_f и h определяется максимальное значение $\sigma_{\text{прил}} = \sigma_{\text{верш}}$ (по зависимости, отображенной на рис. 4 и ограничивающей верхний диапазон $\sigma_{\text{прил}}$), а также рассчитываются величины $\sigma_{\text{прил}}$ для каждой поверхности уровня $\sigma_{\text{ост}_x} = \text{const}$. Из полученных значений строится зависимость $\sigma_{\text{ост}_x}$ от $\sigma_{\text{прил}}$. Пример такой зависимости приведен на рис. 9, где показаны диапазоны изменения $\sigma_{\text{прил}}$ и $\sigma_{\text{ост}}$ для образца с исходной начальной толщиной 400 мкм, которая уменьшилась при растяжении до 360 мкм.

На рис. 9 точками обозначены значения $\sigma_{\text{прил}_x}$ для каждой $\sigma_{\text{ост}_x}$, а вертикальными пунктирными линиями – ограничения этой зависимости внизу диапазона приложенных напряжений нулем и вверху диапазона $\sigma_{\text{верш}} = 160$ МПа. Диапазон возможных значений остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ составляет от 48 до 95 МПа. Корректность полученного диапазона остаточных на-

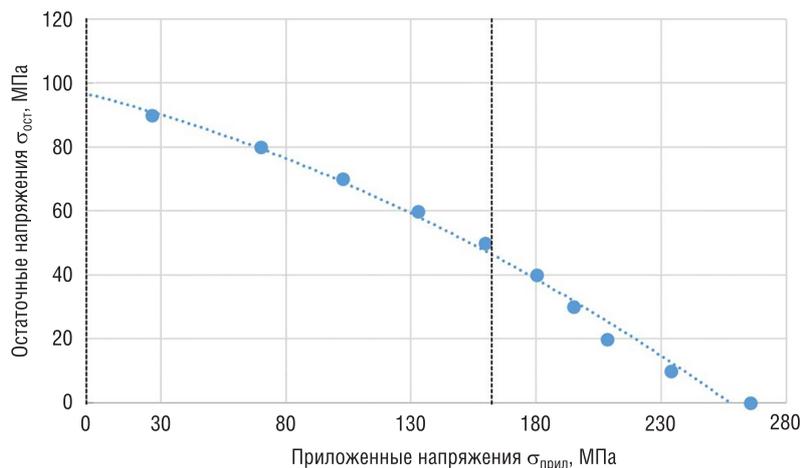


Рис. 9. Пример графика диапазонов приложенных и остаточных напряжений

Fig. 9. An example of ranges plot for applied and residual stresses

пряжений может быть в дальнейших исследованиях проверена измерениями на рентгеновском дифрактометре. Если сравнить полученные результаты с графиком на рис. 3, то можно заметить, что полученное значение $K_f \approx 16,7$, соответствующее $\sigma_{\text{верш}} = 160$ МПа, в случае разгруженного состояния будет близко к начальной точке 5-го цикла, на котором остановились испытания образца с исходной $h = 400$ мкм, а следовательно, полученные по градуировочным поверхностям результаты оценки диапазона приложенных напряжений соответствуют действительности.

Явление снижения магнитоотрывного усилия при наличии в образце напряжений также наблюдалось при проведении экспериментов на реальном гальваническом покрытии. Так, были измерены K_f на участках образца с отслоившимся и прочно удерживаемым силами адгезии покрытием (рис. 10, a), имеющим толщину, близкую к 400 мкм ($h = 396$ мкм). На графике (рис. 10, b) видно, что отрывное усилие на отслоившемся участке выше. Это можно объяснить тем, что отслаивание покрытия привело к снятию приложенных растягивающих напряжений в покрытии.

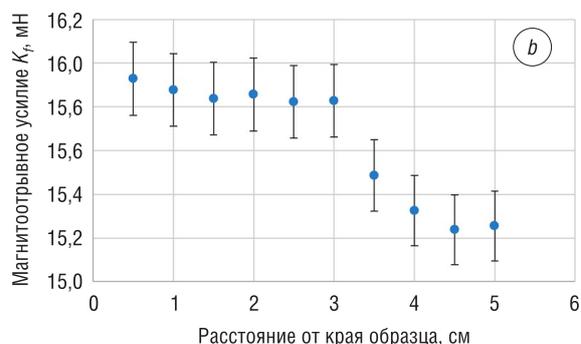


Рис. 10. Образец никелевого покрытия с отслоившейся частью и изменение значений K_f при удалении от края образца ($h = 400$ мкм)

Fig. 10. A nickel plating specimen with exfoliated part and K_f variation from moving off a specimen edge ($h = 400$ μm)

Если сравнить значения K_f на рис. 3 и 10, можно отметить, что значение отрывного усилия в неотслоившейся части покрытия близко к критическим значениям. При этом разрушение покрытия может произойти по двум вариантам: растрескивание, если напряжения превышают временное сопротивление, или отслаивание – при превышении ими (напряжениями) сил адгезии.

Ввиду слабого поля используемого магнита и его малых геометрических размеров на образцах с равномерным распределением напряжений и толщины изменения пондеромоторной силы начинают происходить на расстоянии 5 мм от края образца и менее. Поскольку измерения, представленные на графике рис. 10, b, были получены по центру образца, а максимальное приближение к границе составляло 5 мм, данным эффектом можно пренебречь. Также стоит упомянуть,

что на другом краю образца, где отслоения покрытия не произошло, изменение отрывного усилия отсутствует.

Также из рис. 10, b можно отметить, что изменения отрывного усилия находятся в диапазоне от 15,25 до 15,95 мН, то есть примерно $\pm 2,5\%$ от средней величины 15,6 мН. Следовательно, прибор НТ-800 должен обеспечивать точность на порядок выше. Диапазон измерений отрывного усилия датчиков напряжений находится в пределах 14–25 мН (см. рис. 3). В [23] было показано, что прецизионность измерений (согласно ГОСТ Р ИСО 5725 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений») находится в пределах 1,05% от диапазона измерений, что является достаточным для оценки изменения отрывного усилия от 15,25 до 15,95 мН.

Ввиду отсутствия государственных эталонов единицы механических напряжений, которые требуются для оценки погрешности измерений НТ-800 в соответствии с правилами законодательной метрологии, представление о точностных характеристиках прибора можно получить по рассчитанным значениям прецизионности [23] и сравнением показаний прибора НТ-800 с данными разрывной машины для образца никелевого покрытия толщиной 400 мкм (таблица).

Зависимость разницы показаний прибора НТ-800 и разрывной машины от уровня приложенных напряжений, регистрируемых разрывной машиной, пересчитанных в истинные
A dependence of the NT-800 readings and a testing machine readings difference from the applied stress level, registered by the testing machine and calculated in true coordinates

Приложенные напряжения (по показаниям разрывной машины), МПа	0	60	124	193	264
Разница показаний НТ-800 и разрывной машины при нагружении, МПа	13	–30	–10	–22	
Разница показаний НТ-800 и разрывной машины при разгрузке, МПа		–34	–9	–10	–18

Поскольку зависимость показаний датчиков НТ-800 от приложенных напряжений является обратной (см. рис. 3), невязка градуировочной поверхности (рис. 4) приводит к наибольшему отклонению показаний датчика при наименьшем уровне напряжений.

Закключение. В работе предложено применять магнитный пондеромоторный метод для оценки одноосных растягивающих напряжений в никелевых покрытиях и образцах с толщиной в диапазоне 200–800 мкм.

На основе проведенных экспериментальных исследований установлена возможность использования существующих теоретических основ для оценки напряжений в никелевых образцах путем воздействия на них магнитным полем постоянного магнита и регистрации магнитоотрывного усилия K_f .

Получено соотношение, связывающее магнитоотрывное усилие, толщину образца (покрытия), величину приложенных $\sigma_{\text{прил}}$ и остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$.

Разработана методика, позволяющая по одному измерению получить соотношение между величинами приложенных и остаточных напряжений.

На реальных образцах и покрытиях экспериментально доказана возможность определения степени близости напряжений к критическим уровням, приводящим к разрушению, даже в случае, если соотношение приложенных и остаточных напряжений в образце неизвестно.

Дальнейшая работа в этом направлении может вестись с целью упрощения расчетов и вида градуировочных поверхностей, а также упрощения способа получения этих поверхностей. Для этого может быть использован рентгеновский дифрактометр. Это позволит также провести оценку погрешности метода определения остаточных напряжений, приведенного в данной работе. Следует учитывать, что прослеживается однозначная связь магнитоотрывного усилия с уровнем приложенных напряжений. Остаточные напряжения неразрывно связаны с пластической деформацией, увеличение которой приводит к росту плотности дислокаций в образце. Анализ и использование связи плотности дислокаций и остаточных напряжений, определяемых приведенным в настоящей статье методом и методом рентгеновской дифракции, также может стать направлением дальнейших исследований.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору В. А. Рудницкому за полезное обсуждение результатов данной работы.

Acknowledgment

We thank Doctor of Technical Sciences, Professor V. A. Rudnitskiy for a helpful discussion of the results of this work.

Список использованных источников

1. Буркин, С. П. Остаточные напряжения в металлопродукции : учеб. пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андриюкова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.
2. Улыбин, А. В. Особенности применения резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций / А. В. Улыбин, Г. А. Кукушкина // Инженер.-строит. журн. – 2010. – № 3 (13). – С. 32–34. <https://doi.org/10.18720/MCE.13.13>
3. Equivalent Strain and Stress Models for the Effect of Mechanical Loading on the Permeability of Ferromagnetic Materials / P. Rasilo [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 2019. – Vol. 55, № 6. – P. 1–4. <http://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2890407>
4. Weisensel, N. Magnetotagging, A New Method for Active and Passive Nondestructive Evaluation of Stresses and Defects in Composite Structures / N. Weisensel, C. Liang // Mater. Technol. – 2016. – Vol. 10. – P. 142–144. <https://doi.org/10.1080/10667857.1995.11752613>
5. Костин, В. Н. Оценка упругих и пластических деформаций ферритоперлитных сталей по магнитным свойствам вещества / В. Н. Костин, А. В. Кадров, А. Е. Кусков // Дефектоскопия. – 2005. – № 10. – С. 13–22.
6. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 54–67.
7. Влияние упругой деформации на гистерезисные свойства двуслойного ферромагнетика, составленного из компонентов, обладающих магнитострикцией разных знаков / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 42–56.
8. Иванова, И. Сравнительные измерения напряженного состояния проката углеродистой стали посредством шума Баркгаузена и ультразвука / И. Иванова, Т. Парталин // Дефектоскопия. – 2012. – № 2. – С. 83–94.
9. Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 10. – С. 33–41.
10. Филинов, В. В., Контроль напряженного состояния трубопроводов по магнитным параметрам металла / В. В. Филинов, А. Н. Кузнецов, П. Г. Аракелов // Дефектоскопия. – 2017. – № 1. – С. 41–50.
11. Акулов, Н. С. К теории пондеромоторного магнитного контроля металлов / Н. С. Акулов, В. А. Рудницкий // Докл. АН БССР. – 1970. – Т. 14, № 10. – С. 889–892.
12. Гнутенко, Е. В. Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности / Е. В. Гнутенко, В. А. Рудницкий // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 365–373. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-4-38-45>
13. Вонсовский, С. В. Ферромагнетизм / С. В. Вонсовский, Я. С. Шур. – М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1948. – 816 с.
14. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М.: Гос. науч.-тех. изд-во машиностр. лит., 1963. – 232 с.
15. Schlesinger, M. Modern Electroplating / M. Schlesinger, M. Paunovic. – 5th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. – 736 p. <https://doi.org/10.1002/9780470602638>
16. Моргун, А. И. Возникновение и релаксация внутренних напряжений в гальванических покрытиях: дис. ... канд. техн. наук / А. И. Моргун. – Тюмень, 2003. – 109 л.
17. Кутепов, А. Ю. Влияние внутренних напряжений в никелевых покрытиях на их магнитную проницаемость / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень // Приборостроение-2017: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., 1–3 нояб. 2017 г., г. Минск / редкол.: О. К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 223–224.
18. Кутепов, А. Ю. Оценка растягивающих напряжений в никелевых покрытиях магнитным пондеромоторным методом / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень, Е. В. Гнутенко // Приборостроение-2018: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., 14–16 нояб. 2018 г., г. Минск / редкол.: О. К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 28–30.
19. Рудницкий, В. А. Особенности измерения толщины никелевых покрытий магнитным методом / В. А. Рудницкий, В. И. Антипенко // Докл. Акад. наук БССР. – 1977. – № 3. – С. 202–204.
20. Козлов, А. Г. К оценке влияния напряженного состояния гальванических никелевых покрытий на показания магнитных толщиномеров / А. Г. Козлов, В. А. Рудницкий, А. К. Шукевич // Дефектоскопия. – 1977. – № 5. – С. 61–65.
21. Сандомирский, С. Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел / С. Г. Сандомирский. – Минск: Беларус. навука, 2015. – 244 с.
22. Толмачев, И. И. Физические основы и технология магнитопорошкового контроля / И. И. Толмачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 130 с.
23. Кутепов, А. Ю. Оценка прецизионности прибора НТ-800 для контроля никелевых покрытий / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень, Е. В. Гнутенко // Приборостроение-2020: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 18–20 нояб. 2020 г., г. Минск, Респ. Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 71–72.

References

1. Burkin S. P., Shimov G. V., Andrukova E. A. *Residual Stresses in Metal Products*. Yekaterinburg, Ural University Press, 2015. 248 p. (in Russian).
2. Ulybin A. V., Kukushkina G. A. Features of the application of the resistive electrical contact method for steel structures stress-strain state monitoring. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 2010, no. 3 (13), pp. 32–34. <https://doi.org/10.18720/MCE.13.13> (in Russian).
3. Rasilo P., Aydin U., Martin F., Belahcen A., Kouhia R., Daniel L. Equivalent Strain and Stress Models for the Effect of Mechanical Loading on the Permeability of Ferromagnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/tmag.2018.2890407>
4. Weisensel N., Liang C. Magnetotagging, A New Method for Active and Passive Nondestructive Evaluation of Stresses and Defects in Composite Structures. *Materials Technology*, 2016, vol. 10, pp. 142–144. <https://doi.org/10.1080/10667857.1995.11752613>
5. Kostin V. N., Kadrov A. V., Kuskov A. E. Magnetic Properties of a Material Used to Estimate Elastic and Plastic Strains of Ferrite-Pearlite Steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, vol. 41, iss. 10, pp. 632–639. <https://doi.org/10.1007/s11181-006-0014-7>
6. Kostin V. N., Tsar'kova T. P., Nichipuruk A. P., Loskutov V. E., Lopatin V. V., Kostin K. V. Irreversible changes in the magnetization as indicators of stressed-strained state of ferromagnetic objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45, iss. 11, pp. 786–796. <https://doi.org/10.1134/S1061830909110059>
7. Gorkunov E. S., Subachev Y. V., Povolotskaya A. M., Zadvorkin S. M. The influence of elastic deformations on the hysteresis properties of a two-layer ferromagnet composed of components with magnetostrictions of opposite signs. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, iss. 8, pp. 469–480. <https://doi.org/10.1134/S1061830914080051>
8. Ivanova I., Partalin T. Comparative measurements of the stress state in a rolled carbon steel using magnetic Barkhausen noise and ultrasonic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, iss. 2, pp. 137–146. <https://doi.org/10.1134/S1061830912020040>
9. Kostin V. N., Vasilenko O. N., Filatenkov D. Y., Chekasina Yu. A., Serbin E. D. Magnetic and magnetoacoustic testing parameters of the stressed-strained state of carbon steels that were subjected to a cold plastic deformation and annealing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, iss. 10, pp. 624–632. <https://doi.org/10.1134/S1061830915100071>
10. Filinov V. V., Kuznetsov A. N., Arakelov P. G. Monitoring stressed state of pipelines by magnetic parameters of metal. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, iss. 1, pp. 51–61. <https://doi.org/10.1134/S1061830917010065>
11. Akulov N. S., Rudnitskiy V. A. On the ponderomotive magnetic metal testing theory *Doklady Akademii nauk BSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the BSSR], 1970, vol. 14, no. 10, pp. 889–892 (in Russian).
12. Gnutenko Y. V., Rudnitskiy V. A. Determination of the thickness of the components of a double-layer nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with unilateral access to the controlled surface. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 365–373 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-4-38-45>
13. Vonsovskiy S. V., Shur I. S. *Ferromagnetism*. Moscow, Leningrad, State Publ. House of Technical and Theoretical Literature, 1948. 816 p. (in Russian).
14. Birger I. A. *Residual Stresses*. Moscow, State Scientific and Technical Publ. House of Machine-building Literature, 1963. 232 p. (in Russian).
15. Schlesinger M., Paunovic M. *Modern Electroplating*. 5th ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2011. 736 p. <https://doi.org/10.1002/9780470602638>
16. Morgun A. I. *The Emergence and Relaxation of Internal Stresses in Electroplated Coatings*. Tyumen, 2003. 109 p. (in Russian).
17. Kutepov A. Yu., Kren A. P. The influence of internal stresses in nickel coating on its magnetic permeability. *Priborostroenie-2017: materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 1–3 noyabrya 2017 goda, Minsk* [Instrument Engineering-2017: Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference, November 1–3, 2017, Minsk]. Minsk, BNTU, 2017, pp. 223–224 (in Russian).
18. Kutepov A. Yu., Kren A. P., Gnutenko E. V. Tensile stresses evaluation in nickel coating using magnetic ponderomotive method. *Priborostroenie-2018: materialy 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 14–16 noyabrya 2018 goda, Minsk* [Instrument Engineering-2018: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference, November 14–16, 2018, Minsk]. Minsk, BNTU, 2018, pp. 28–30 (in Russian).
19. Rudnitskiy V. A., Antipenko V. I. Features of nickel coating thickness measurement using magnetic method. *Doklady Akademii nauk BSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the BSSR], 1977, no. 3, pp. 202–204 (in Russian).
20. Kozlov A. G., Rudnitskiy V. A., Shukevich A. K. On evaluation of galvanic nickel coatings stress state influence on magnetic thickness gauges readings. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1977, no. 5, pp. 61–65 (in Russian).
21. Sandomirski S. G. *Calculation and Analysis of the Demagnetizing Factor of Ferromagnetic Objects*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 244 p. (in Russian).
22. Tolmachev I. I. *Physical Foundations and Technology of Magnetic Particle Testing*. Tomsk, TPU Publ. House, 2007. 130 p. (in Russian).
23. Kutepov A. Yu., Kren A. P., Gnutenko E. V. NT-800 nickel testing device precision evaluation. *Priborostroenie-2020: materialy 13-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 18–20 noyabrya 2020 goda, Minsk* [Instrument Engineering-2020: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference, November 18–20, 2020, Minsk]. Minsk, BNTU, 2020, pp. 71–72 (in Russian).

Информация об авторах

Кутепов Алесъ Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ales.kutepov@gmail.com

Крень Александр Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

Гнутенко Егор Владимирович – старший научный сотрудник лаборатории контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gnutenkoev@gmail.com

Information about the authors

Ales Yu. Kutepov – Junior Researcher of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ales.kutepov@gmail.com

Alexander P. Kren – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

Egor V. Gnutenko – Senior Researcher of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gnutenkoev@gmail.com