

УДК 621.98.044.7

А. Н. Матяс

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск,
Республика Беларусь, a.matsias@phti.by, priemnaya@phti.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ 40X13 И СПЛАВА VT6 ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В работе исследованы механизмы упрочнения стали 40X13 и титанового сплава VT6 при магнитно-импульсном воздействии на плоском и цилиндрическом индукторах. Установлено, что основным силовым фактором процесса является амплитудное магнитное давление p .

Для оценки напряженно-деформированного состояния металла проведен расчет пикового (динамического) ударного давления $p_{\text{пик}}$. Исследования позволяют предположить, что при достижении значений около 100 МПа для стали 40X13 и 876 МПа для сплава VT6 могут возникать микросдвиги в кристаллической решетке, увеличивающие плотность дислокаций без превышения макроскопического предела текучести (450 МПа для стали 40X13 и 800...900 МПа для сплава VT6). Особое внимание уделено роли магнитной индукции, которая через относительную магнитную проницаемость μ_r определяет глубину проникновения электромагнитного поля и эффективность деформационного упрочнения. На основании полученных зависимостей предложена методика расчета суммарного статического усилия при магнитно-импульсной обработке, что позволит оптимизировать режимы обработки для исследуемых материалов. Определено влияние величины технологического зазора a между индуктором и образцом на величину давления p , построена графическая зависимость. Введение в расчетную схему динамического коэффициента и определение пикового ударного усилия позволяют более точно прогнозировать отклик кристаллической структуры на кратковременный импульс.

Ключевые слова: магнитно-импульсное упрочнение; сталь 40X13; сплав VT6; магнитное давление; пиковое давление; магнитная индукция; статическое усилие; глубина проникновения.

Рис. 4. Библиогр.: 4 назв.

A. N. Matsias

State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus",
10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, a.matsias@phti.by, priemnaya@phti.by

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF 40X13 STEEL AND VT6 ALLOY UNDER MAGNETIC-IMPULSE INFLUENCE

The paper investigates the strengthening mechanisms of 40Kh13 steel and VT6 titanium alloy under magnetic pulse treatment using flat and cylindrical inductors. It has been established that the peak magnetic pressure p is the primary driving force of the process.

To evaluate the stress-strain state of the metal, the peak (dynamic) impact pressure $p_{\text{пик}}$ has been calculated. The studies suggest that reaching values of approximately 100 MPa for 40Kh13 steel and 876 MPa for VT6 alloy can induce micro-slips in the crystal lattice. These micro-slips increase dislocation density without exceeding the macroscopic yield strength (450 MPa for 40Kh13 and 800...900 MPa for VT6). Particular attention has been paid to the role of magnetic induction, which, through relative magnetic permeability μ_r , determines the penetration depth of the electromagnetic field and the strain hardening efficiency. Based on the obtained correlations, a method for calculating the total static force during MPT has been proposed. A graphical dependence of pressure p on the technological gap a between the inductor and the work piece to optimize processing parameters has been developed. The dynamic coefficient introduction into the calculation scheme and the determination of the peak impact force make it possible to predict more accurately the crystal structure response to the corresponding impulse.

Key words: magnetic pulse treatment; 40Kh13 steel; VT6 alloy; magnetic pressure; peak pressure; magnetic induction; total static force; penetration depth.

Fig. 4. Ref.: 4 titles.

Введение. Современное машиностроение предъявляет высокие требования к эксплуатационным характеристикам деталей, работающих в условиях интенсивного износа и циклических нагрузок. Особое место среди конструкционных материалов занимают высоко-

хромистые стали, такие как 40X13, и титановые сплавы типа ВТ6, сочетающие высокую коррозионную стойкость с механической прочностью, которые широко востребованы в авиастроении, медицине и энергетическом машиностроении благодаря уникальному сочетанию своих свойств. Однако эксплуатация изделий из данных материалов в условиях знакопеременных нагрузок требует создания модифицированного поверхностного слоя с повышенной плотностью дефектов кристаллической структуры, что традиционно достигается методами поверхностного пластического деформирования.

Одним из наиболее перспективных методов модификации структуры поверхностных слоев является упрочнение магнитно-импульсной обработкой (далее — МИО). В отличие от традиционной пластической деформации, МИО позволяет инициировать микропластические процессы на уровне кристаллической решетки, увеличивая плотность дислокаций при сохранении макроскопической целостности детали [1; 2].

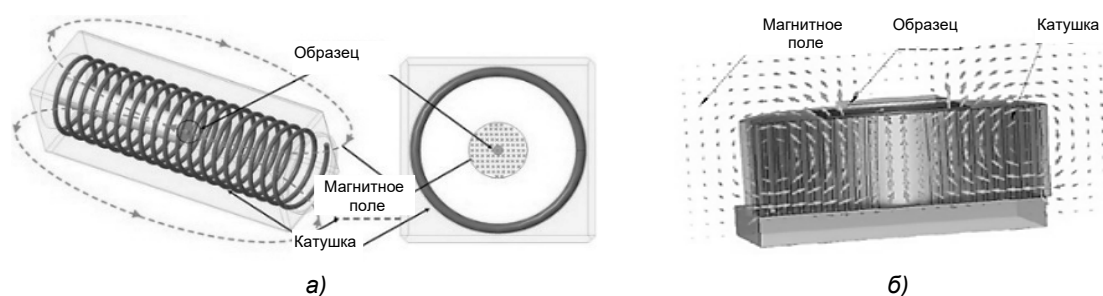
Схематично принцип действия магнитного поля, используемого для процесса обработки образцов в цилиндрическом и на плоском индукторе, показан на рисунке 1 [3; 4].

Линии магнитной индукции проходят через образец, вызывая микроскопические изменения в микроструктуре образцов. Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, подача тока возбуждения в рабочую катушку приводит к генерации индуцированного тока в образце, расположенном внутри (цилиндрическая схема) или на поверхности (плоская схема) индуктора. Вследствие скин-эффекта наведенный ток концентрируется в поверхностном слое металла, при этом плотность тока возрастает при уменьшении рабочего зазора между катушкой и заготовкой. Возникающее интенсивное магнитное давление, обусловленное взаимодействием тока возбуждения и индуцированного тока, обеспечивает упрочняющее воздействие на металлическую поверхность. При проектировании процессов МИО металлов необходимо знать распределение давления магнитного поля на поверхность заготовки. Зная величину давления магнитного поля, можно определить нагруженно-деформационное состояние упрочняемых изделий и другие технологические характеристики [5; 6].

Научная значимость исследования заключается в необходимости детального математического и физического описания силового взаимодействия для материалов с принципиально разной природой: ферромагнитной стали 40X13 и парамагнитного сплава ВТ6. Различие в их относительной магнитной проницаемости и электропроводности диктует разные условия проникновения электромагнитной волны и распределения давления по глубине слоя.

В данной работе обоснована критическая важность расчета таких параметров, как амплитудное магнитное давление p и пиковое (динамическое) ударное давление $p_{\text{пик}}$. Введение в расчетную схему динамического коэффициента и определение пикового ударного усилия позволяют более точно прогнозировать отклик кристаллической структуры на кратковременный импульс.

Целью работы является установление физических закономерностей процесса МИО при использовании плоских и цилиндрических индукторов. Основное внимание уделено выявлению зависимости магнитного давления от величины технологического зазора a и разработке комплексной методики расчета суммарного статического усилия. Полученные результаты позволяют научно обосновать выбор энергетических режимов обработки, обеспечивающих требуемый уровень упрочнения за счет контролируемого роста плотности дислокаций.



Рисунк 1. — Принцип действия обработки импульсным магнитным полем

Материалы и методы исследования. В роли объектов исследования выступают материалы с принципиально различными электрофизическими и механическими свойствами: высокохромистая сталь 40X13 и титановый сплав ВТ6.

Известно, что разный химический состав исследуемых сплавов и процент содержания в них легирующих добавок очень сказываются на величине электрического удельного сопротивления ρ . Углеродистые и низколегированные стали в несколько раз лучше проводят электрический ток, чем высоколегированные и жаропрочные стали, которые имеют высокое содержание никеля и хрома. У парамагнетиков электрическое удельное сопротивление ρ на порядок выше, чем у ферромагнетиков.

Для моделирования и проведения экспериментальной МИО задействовано технологическое оборудование на базе магнитно-импульсных установок МИП-18 и МИУ-3. Моделирование силового воздействия проводилось для двух типов рабочих органов — индукторов. Для исследований и обработки плоских образцов из коррозионно-стойкой стали 40X13 использовали плоский индуктор диаметром 150 мм с медной шиной и изоляционным слоем. Спираль этого индуктора содержит 18 витков, его индуктивность — 25,8 мкГн, значение напряженности магнитного поля H при МИО составляет $2,793 \cdot 10^6$ А/м. Для обработки цилиндрических образцов из титанового сплава ВТ6 использовали цилиндрический индуктор $\varnothing 10,5$ мм с длительностью импульса 147 мкс и частотой, равной 6,8 кГц.

Результаты исследования и их обсуждение. 1. Основным силовым фактором процесса является амплитудное магнитное давление p , возникающее в результате взаимодействия полей. Величина этого давления прямо пропорциональна квадрату плотности магнитного потока B .

Точный расчет распределения магнитного давления по поверхности позволяет прогнозировать напряженно-деформированное состояние изделия и оптимизировать технологические параметры упрочнения [7]:

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{4\pi 10^{-7} (2,793 \cdot 10^6)^2}{2} \approx 4,9 \cdot 10^6 \text{ Па (4,9 МПа)}, \quad (1)$$

где B — магнитная индукция;
 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная;
 H — напряженность магнитного поля.

2. Оценка напряженно-деформированного состояния металла при магнитно-импульсном воздействии требует расчета пикового (динамического) ударного давления $p_{\text{пик}}$. Ввиду микросекундного диапазона нарастания импульса μ_s , инерционные силы материала препятствуют мгновенному макросмещению объемов металла, что вызывает резкий скачок внутренних напряжений в поверхностном слое.

Для учета динамических эффектов и специфики физико-механических свойств стали 40X13 вводится коэффициент динамичности $K_{\text{дин}}$. При принятых технологических режимах обработки значение принимается равным 20. Это позволяет адекватно оценить амплитуду ударной волны, проникающей вглубь металла, и рассчитать итоговый эффект упрочнения [8]:

$$p_{\text{пик}} = pK_{\text{дин}} = 4,9 \cdot 10^6 \cdot 20 \approx 97,8 \text{ МН}.$$

Именно это значение (почти 1 000 атм.) ответственно за упрочнение. Оно создает микродвиги в кристаллической решетке, позволяет увеличивать плотность дислокаций, хотя и не достигает макроскопического предела текучести: 450 МПа — для стали 40X13, 800...900 МПа — для сплава ВТ6.

3. Магнитная индукция, в свою очередь, связана с напряженностью поля через относительную магнитную проницаемость материала μ_r [9]:

$$B = \mu_0 \mu_r H. \quad (2)$$

Кроме того, следует учитывать, что магнитная проницаемость материала μ_0 меняется в зависимости от величины напряженности магнитного поля H . На рисунке 2 представлен график и физическое объяснение того, что происходит с материалами (40X13 и ВТ6) при сверхвысоких полях.

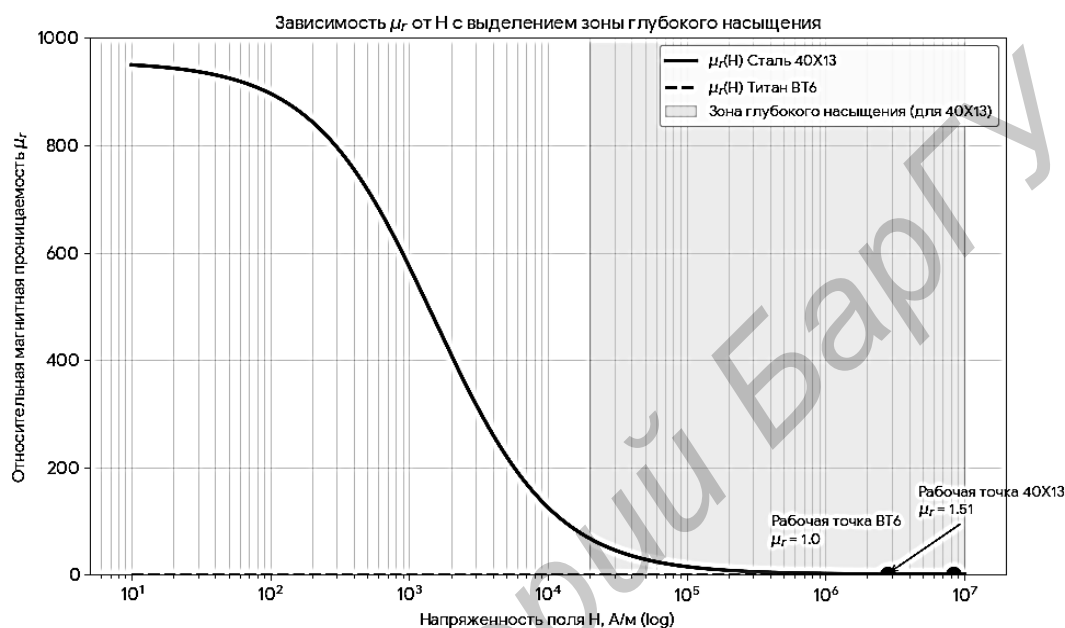


Рисунок 2. — Зависимость магнитной проницаемости материала μ_r от напряженности магнитного поля H коррозионно-стойкой стали 40X13 и титанового сплава ВТ6

Для коррозионно-стойкой стали 40X13 значение магнитной проницаемости значительно выше единицы (в слабых полях она может достигать 600...800), однако при воздействии магнитного поля с экстремально высокой напряженностью, как в нашем случае, любой ферромагнетик находится в состоянии глубокого технического насыщения. При очень высоких значениях поля ($H > 10^5$ А/м) намагниченность M достигает своего предела и перестает расти. В этом случае относительная магнитная проницаемость μ стремится к единице ($\mu \rightarrow 1$). Для ферромагнитных материалов (сталь 40X13) зависимость имеет нелинейный характер и описывается кривой Столетова. Для парамагнетиков (титан ВТ6) эта величина — константа ($\mu = 1$). Тогда выражение (2) будет иметь следующий вид [7; 9]:

$$B = \mu_0 H = 1,26 \cdot 10^6 \cdot 2,793 \cdot 10^6 = 3,5 \text{ Тл}. \quad (3)$$

Поскольку сталь 40X13 является ферромагнетиком, расчет разделяется на два этапа: определение индукции в зазоре (рабочее поле) и в самом материале. Внутри самого металла индукция теоретически должна быть выше $B = \mu_0 H$. Однако здесь вступают в силу два фактора:

1) насыщение — для большинства сталей техническое насыщение B наступает при значениях 1,8...2,2 Тл [10];

2) сверхсильные поля — полученное значение 3,51 Тл уже значительно превышает предел насыщения стали. Это означает, что материал «перенасыщен», дальнейший рост индукции идет почти как в вакууме, но с добавлением намагниченности насыщения железа.

Реальное значение индукции в поверхностном слое [7]

$$B_{\text{реал}} = B + J_s = 3,51 + 1,8 = 5,31 \text{ Тл},$$

где J_s — намагниченность насыщения для стали 40X13; $J_s \approx 2,0$ Тл.

4. Согласно результатам проведенного ранее моделирования для стального ножа, площадь воздействия на инструмент при варианте размещения изделия «кромка за середину» составит 120 см^2 . Следовательно, расчет суммарного статического усилия F при МИО [11]

$$F = pS = 4,9 \cdot 10^6 \cdot 0,012 \approx 58,8 \text{ кН},$$

где S — площадь обрабатываемой поверхности инструмента.

5. Расчет динамического коэффициента и пикового ударного усилия. Особенностью МИО является крайне малая длительность импульса (45 мкс) и высокая крутизна нарастания тока. В таких условиях нагружение носит ударный характер. Пиковое (мгновенное) суммарное усилие в момент удара [10]

$$F_{\text{пик}} = FK_{\text{дин}} = 58,8 \cdot 10^3 \cdot 20 \approx 1176 \text{ кН} (1,18 \text{ МН}).$$

В техническом эквиваленте это соответствует мгновенному удару силой около 120 т. Сочетание высокой плотности вихревых токов ($7,9 \cdot 10^8 \text{ А / м}^2$) и экстремальной индукции (5,31 Тл) генерирует значительные объемные силы Лоренца ($f = jB$). Данный фактор в совокупности с ударным давлением и кратковременным адиабатическим нагревом обеспечивает превышение порога микропластичности. Это приводит к интенсивному размножению дислокаций, их закреплению на выделениях карбидной фазы и формированию благоприятных сжимающих остаточных напряжений в приповерхностном слое.

Рассмотрим случай обработки в цилиндрическом индукторе образцов из титанового сплава ВТ6, который относится к парамагнетикам — материалам, имеющим низкую магнитную проницаемость ($\mu = 1$). В многовитковом соленоиде напряженность поля прямо пропорциональна числу витков n и току I :

$$H = \frac{In}{L} = \frac{16 \cdot 31400}{0,06} \approx 8,4 \cdot 10^6 \text{ А / м}.$$

Согласно формуле (3), индукция магнитного поля B составит 10,5 Тл, с учетом зазора — порядка 11,5 Тл. За счет того, что титан является парамагнетиком, значение индукции на его поверхности не увеличивается за счет магнитных свойств материала, как в случае со сталью 40X13, а остается равным полю индуктора. Тогда удельное магнитное давление, которое радиально сжимает титановый образец в момент пиков тока, при подстановке в уравнение (1) будет составлять порядка 43,8 МПа, а пиковое ударное давление $p_{\text{пик}} = 876 \text{ МПа}$.

На боковую поверхность прутка площадью $S = 18,8 \text{ см}^2$ действует суммарная сила:

а) статическое усилие: $F = 82,8 \text{ кН}$;

б) динамическое усилие: длительность 147 мкс при 6,8 кГц соответствует одному полному периоду колебаний. С учетом ударного нарастания поля пиковое мгновенное усилие $F_{\text{пик}} = 1,65 \text{ МН} (\approx 170 \text{ т})$.

Для завершения физической картины процесса наложим кривую магнитной индукции B на график напряженности H . Это позволит на рисунке 3 увидеть ту самую точку «потолка», после которой сталь 40X13 перестает намагничиваться и начинает вести себя как «пустое пространство» (аналогично титану).

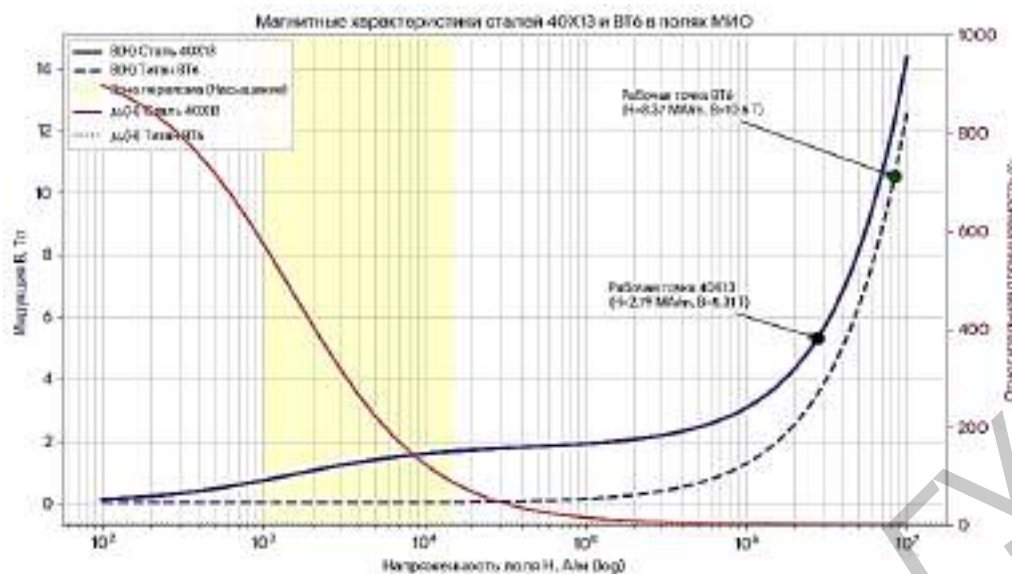


Рисунок 3. — Совмещенный график $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$

На графике показана зона «перелома» (желтый фон), это область напряжений от 10^3 до $1,5 \cdot 10^4$ А / м. Именно здесь кривая $B = H$ стали 40X13 резко меняет наклон, а проницаемость начинает стремительно падать. В этой зоне сталь перестает эффективно усиливать магнитный поток.

Рабочая точка стали 40X13 (3,51 Тл): значение находится далеко за порогом насыщения. Это означает, что μ стали упала до 1,0...1,2. Металл перестал быть эффективным «магнитопроводом» и стал просто проводником.

Рабочая точка сплава ВТ6 (10,52 Тл): для титана зона перелома отсутствует — индукция растет линейно, а проницаемость всегда равна единице. Это позволяет достигать экстремальных значений индукции в 10 Тл и выше.

КПД процесса: тот факт, что обе точки находятся в линейной зоне (где графики параллельны), говорит о том, что магнитное давление ($p \sim B^2$) в экспериментах растет предсказуемо и стабильно. График подтверждает, что при полученных токах получилось преодолеть внутренние ограничения исследуемых материалов. Для стали это позволило получить «избыточное» давление, а для титана — выйти на уровень силового ударного обжатия.

6. Физическое обоснование. Несмотря на то, что исходное давление $p = 4,9$ МПа значительно ниже предела текучести стали 40X13 ($\sigma \approx 450...600$ МПа), упрочнение достигается за счет следующих факторов:

1) ударная амплитуда — при пиковом усилии в 1,18 МН локальные динамические напряжения в скин-слое соизмеримы с пределом текучести материала. Это инициирует акты микропластической деформации, которые локализованы в приповерхностных объемах металла;

2) акустическая активация — импульсный характер нагрузки (частота 5,2 кГц) и высокая скорость деформации способствуют «разблокировке» дислокаций, закрепленных на примесных центрах (атмосферах Коттрелла);

3) релаксация — при индукции выше 3 Тл в металлическом изделии возникают колоссальные вихревые токи (токи Фуко), которые обеспечивают механический удар с суммарным усилием в 1,18 МН для стали 40X13 и 1,65 МН для ВТ6, что, в свою очередь, обеспечивает перераспределение пиковых остаточных напряжений, накопленных после предыдущих этапов обработки, и формирование стабильной дислокационной структуры.

В процессе упрочнения определяющим является переход от потенциальной энергии магнитного поля к кинетической энергии удара, что позволяет воздействовать на структуру закаленной стали и титанового сплава на межатомном уровне.

Влияние величины технологического зазора в системе «индуктор—образец» на параметры давления. Для определения влияния величины технологического зазора a между индуктором и образцом на величину давления p построили зависимость, представленную на рисунке 4.

График показывает, что система стабильна, а выбранный зазор обеспечивает необходимый баланс между мощностью импульса и электрической прочностью зазора.

Анализ графика показывает, что при увеличении зазора уменьшение величины p плавно замедляется, приближаясь к нулю. Таким образом, наиболее предпочтительной для осуществления МИО является величина зазора, равная 0,5...1,0 мм. Зазор менее 1 мм применять нежелательно из-за опасности пробоя изолирующей прокладки сильным электромагнитным полем. В этом случае достигается максимально возможная для данных условий МИО величина давления на заготовку, соответственно, максимальная эффективность магнитно-импульсной упрочняющей обработки.

Оценка глубины проникновения электромагнитного поля. При прохождении переменного тока через проводник плотность распределения зарядов максимальна на его поверхности и экспоненциально снижается к центру. При МИО по закону Фарадея вследствие взаимной индукции участков образцов индукционный ток вытесняется ко внешнему периметру сечения образца [9]. Толщина этого активного слоя (скин-слоя δ) определяется моментом, когда плотность тока падает до $1/e \approx 0,368$ от поверхностного значения. В данной зоне локализуется около 86,5 % выделяемой тепловой энергии.

Расчет глубины проникновения поля для исследуемых материалов проводится по формуле [7; 8]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 5200 \cdot 1 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6}}} \approx 5,18 \text{ мм},$$

где ρ — удельное сопротивление материала 40X13, Ом · м; $\rho \approx 0,55 \cdot 10^{-6}$;

f — частота сигнала тока, Гц.

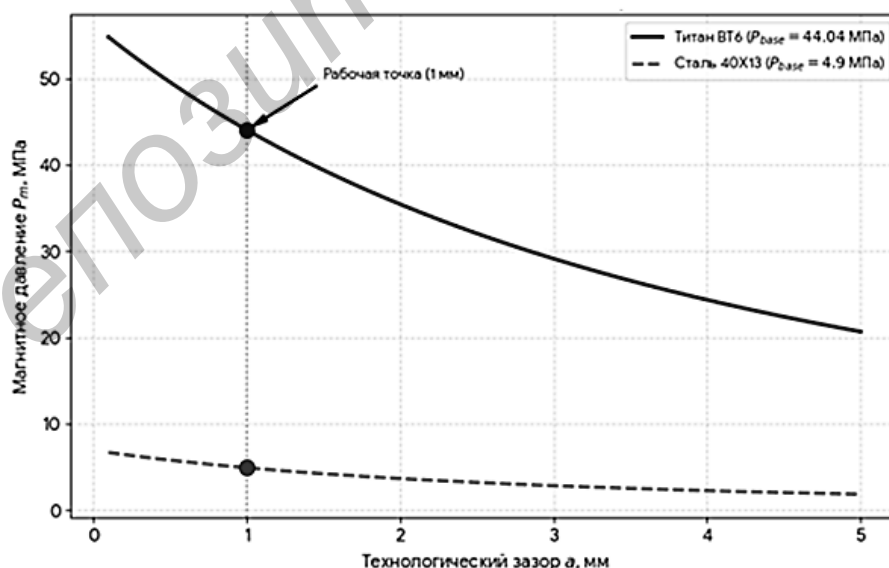


Рисунок 4. — Зависимость давления в системе «индуктор—образец» от величины технологического зазора между индуктором и образцом

Заключение. Предложена методика расчета суммарного статического усилия при МИО коррозионно-стойкой стали и титанового сплава, что позволит оптимизировать режимы упрочняющей обработки исследуемых материалов. Определено объемное воздействие: глубина проникновения свыше 5 мм полностью перекрывает зону дефектных напряжений после механической обработки (шлифовки/фрезеровки), которые обычно залегают на 0,5...1,0 мм. Это формирует мощный упрочненный слой с плавным градиентом свойств от поверхности к сердцевине, что обеспечивает структурную целостность: значительная толщина скин-слоя минимизирует риск возникновения эффекта «скорлупы» (отслоения упрочненной зоны) за счет исключения резких скачков напряжений.

Инерционный подпор обеспечивается распределением магнитного давления (5 МПа) на глубину более 5 мм, что создает эффект массивного воздействия, трансформируя импульс в мощный ударный вектор (эквивалентом 120 т).

Установлено, что при МИО сплава ВТ6 при частоте 6,8 кГц с удельным электрическим сопротивлением, равным $1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом · м, глубина скин-слоя составит 7,9 мм. Таким образом, получаем, что магнитное поле не просто давит на поверхность, оно насквозь пронизывает весь объем прутка, поскольку радиус заготовки 5 мм существенно меньше глубины проникновения 7,9 мм. Это создает объемные силы Лоренца, которые «встряхивают» кристаллическую решетку титана по всему сечению одновременно.

Список цитируемых источников

1. Матяс, А. Н. Определение эффективности использования упрочняющей магнитно-импульсной обработки для повышения периода стойкости режущего инструмента / А. Н. Матяс, А. М. Милокова // Механическое оборудование металлургических заводов. — Магнитогорск, 2020. — С. 3—10.
2. Исследование влияния импульсных магнитных полей на свойства поверхности образцов титанового сплава ВТ6 с покрытием ZrN, ZrNbN / А. Н. Матяс, А. Ю. Изобелло [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2024. — Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Обработка металлов давлением. — С. 127—138.
3. Матяс, А. Н. Разработка экспериментального оборудования для нового метода магнитно-импульсной обработки с независимым регулированием длительности импульса / А. Н. Матяс, А. А. Лях // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2023. — Вып. 2 (14). — С. 16—27.
4. Глушечков, В. А. Технологии магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глушечков, Д. Г. Черников. — Самара : Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2014.
5. Исследование физико-механических свойств титанового сплава после магнитно-импульсной обработки / А. В. Алифанов, А. М. Милокова, А. Н. Матяс [и др.] // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2021. — Вып. 1 (9). — С. 18—26.
6. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов, А. М. Милокова, А. Н. Матяс [др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2021. — Кн. 1 : Новые технологии и материалы. — С. 127—153.
7. Батыгин, Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий : в 3 т. / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хищенко. — Харьков : МОСТ-Торнадо, 2003. — Т. 1. — 284 с.
8. Глушечков, В. А. Технологии магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глушечков, Д. Г. Черников. — Самара : Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2014. — 208 с.
9. Преображенский, А. А. Магнитные материалы и элементы : учеб. для вузов / А. А. Преображенский, И. Ш. Бишард. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1986. — 352 с.
10. Касьяненко, М. Г. Аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей при проектировании электрических машин / М. Г. Касьяненко, В. Ф. Матюхов, М. А. Ваганов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2018. — № 9. — С. 69—75.
11. Батыгин, Ю. В. Теория и техника магнитно-импульсных технологий / Ю. В. Батыгин, С. Н. Гнатов, Е. А. Чаплыгин. — Харьков : ХНАДУ, 2011. — 240 с.

Поступила в редакцию 08.04.2026.