

УДК 538.9:669.713.017

## Исследование микротвердости и параметра пластичности свинца во внешних магнитных полях с индукцией до 0.5 Тл

*А.А. Серебрякова, Д.В. Загуляев, В.В. Шляров, В.Е. Громов, К.В. Аксенова*

Сибирский государственный индустриальный университет  
(Новокузнецк, Россия)

## Study of Microhardness and Plasticity Parameter of Lead in External Magnetic Fields with Induction up to 0.5 T

*A.A. Serebryakova, D.V. Zaguliaev, V.V. Shlyarov, V.E. Gromov, K.V. Aksenova*

Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)

Проведены измерения микротвердости образцов технически чистого свинца без воздействия и при воздействии внешнего магнитного поля с индукцией 0.3 Тл, 0.4 Тл, 0.5 Тл. Получены зависимости микротвердости поверхности свинца марки С2 от времени выдержки в магнитном поле, отражающие влияние магнитного поля на пластические характеристики свинца. Выявлено время выдержки, при котором наблюдается максимальный эффект влияния на микротвердость. Дополнительно были проведены испытания на микротвердость образцов технически чистого свинца без воздействия и при воздействии внешнего магнитного поля с индукцией до 0.3, 0.4 и 0.5 Тл и временем обработки 0.25, 0.5 и 1 час. По полученным данным микротвердости вычислен параметр пластичности свинца в исходном состоянии и после обработки во внешнем магнитном поле, показаны зависимости параметра пластичности от времени обработки. Установлен характер изменения параметра пластичности при обработке свинца в магнитном поле с индукцией до 0.5 Тл. Показаны проценты изменения значений микротвердости в зависимости от индукции магнитного поля.

**Ключевые слова:** свинец, магнитное поле, микротвердость, пластичность.

DOI: 10.14258/izvasu(2023)4-07

### Введение

Изучение поведения металлов и сплавов, подвергнутых внешним энергетическим воздействиям, является важным вопросом современного физического материаловедения [1]. Под внешними энергетическими воздействиями рассматриваются: ионные пучки, обработка при помощи плазмы и ультразвука, обработка выдержкой в магнитном поле. В данной работе будет рассмотрен такой вид внешнего воздействия, как слабое магнитное поле (до 1 Тл). Магнитные поля

Microhardness tests of samples of technically pure lead are carried out without and with exposure to external magnetic fields with inductions of 0.3 T, 0.4 T, and 0.5 T. The dependences of the C2-grade lead surface microhardnesses on the exposure times in a magnetic field are obtained, thus reflecting the influence of the magnetic field on the plastic characteristics of lead. The exposure time at which the maximum effect on microhardness occurs is revealed. Additional microhardness tests are carried out for cases with magnetic fields with inductions of up to 0.3, 0.4, and 0.5 T and exposure times of 0.25, 0.5, and 1 hour. Following the obtained microhardness data, the plasticity parameters of lead samples in their initial state and after exposure are calculated. The dependences of the plasticity parameters on the exposure times are shown. The behavior of the plasticity parameter of lead samples during their exposure to external magnetic field with induction up to 0.5 T is revealed. The percent changes in the values of microhardness depending on the magnetic field induction are shown.

**Keywords:** Lead, magnetic field, microhardness, plasticity.

часто используются при обработке материалов, так как, согласно исследованиям, известно, что магнитная обработка позволяет повысить качество материала [2–5]. Широко распространены исследования, выполненные с применением для обработки материалов сильных магнитных полей (от 1 Тл до 45 Тл) [3, 6–7]. Воздействие постоянного магнитного поля позволяет управлять механическими свойствами (прочность, пластичность и твердость) и процессами пластической деформации различных материалов и сплавов.

Постоянное магнитное поле индукцией более 1 Тл оказывает влияние на показатели пластической деформации ферромагнитных (сталь), парамагнитных (алюминий) и диамагнитных (медь) металлов. При растяжении или сжатии достигается изменение сопротивления деформации до 25 %.

Наибольшее влияние оказывается на деформацию металлов повышенной прочности. Магнитное поле влияет на интенсивность упрочнения металлов в процессе деформации, что зависит от магнитных свойств металлов и вида напряженно-деформированного состояния при их обработке [8–10]. Характер воздействия магнитного поля на материал может зависеть от магнитной природы материала. Как известно, по магнитной природе металлы делятся на ферромагнетики, парамагнетики, антиферромагнетики и диамагнетики [11–14].

В данной работе исследуется влияние магнитного поля на диамагнетик, технически чистый свинец марки С2. Свинец выбран в качестве материала исследований не случайно. Этот металл широко применяется в различных отраслях промышленности (металлургическая, строительная, энергетическая) и в медицине [15]. Преимуществами данного металла являются его высокая коррозионная стойкость и способность поглощать радиационное излучение. Недостатки свинца — его чрезмерная подверженность пластической деформации, что, несмотря на его преимущества, не позволяет расширить сферы его использования. В связи с этим достаточно актуально исследовать динамику микротвердости и параметра пластичности данного металла при воздействии магнитного поля.

Цель данной работы — исследование динамики микротвердости и параметра пластичности свинца марки С2 под влиянием магнитного поля с различными значениями индукции 0.3 Тл, 0.4 Тл и 0.5 Тл. Данное

исследование является актуальным, так как известны различные результаты влияния сильного магнитного поля (до 45 Тл) на материалы и сплавы, а область влияния слабых магнитных полей (индукция до 1 Тл) на материалы остается малоизученной.

#### Материал и методика исследования

Для испытаний на микротвердость применялись образцы свинца в форме прямоугольного параллелепипеда высотой 1.2 см, шириной 0.5 см, длиной 1.5 см. Образцы свинца, предварительно подвергнутые рекристаллизационному отжигу при температуре 200 °С в течение двух часов, в последующем охлаждались 24 часа до комнатной температуры. В процессе данной процедуры структура поликристаллического свинца была приведена в наиболее однородное состояние.

Индукция магнитного поля составляла 0.3 Тл, 0.4 Тл, 0.5 Тл. В качестве источника магнитного поля использовался постоянный электромагнит [16], имеющий возможность регулирования индукции магнитного поля двумя способами: 1) путем изменения силы тока в катушках; 2) путем изменения расстояния между полюсами. В данной работе индукция была отрегулирована с помощью изменения силы тока в катушках. Величина индукции магнитного поля измерялась миллитесламетром ТПУ. Испытания проводились при комнатной температуре.

При исследовании микротвердости образцы располагались в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца с размерами 1.5×1.2 см и пронизывали ее. Обработку магнитным полем в настоящей работе первоначально проводили по четырем режимам. Режим 1, 2, 3 и 4 представляли собой выдержку внутри поля с индукцией 0.3, 0.4 и 0.5 Тл в течение 1 часа, 2 часов, 3 часов, 4 часов (табл.).

Режимы выдержки образцов в магнитном поле

Режим №	Выдержка в магнитном поле, часы	Значения индукции магнитного поля, Тл
1	1	0.3; 0.4; 0.5
2	2	0.3; 0.4; 0.5
3	3	0.3; 0.4; 0.5
4	4	0.3; 0.4; 0.5

Процедура микроидентификации (рис. 1) проводилась сразу же после выведения образца из магнитного

поля (получение данных о начальном эффекте влияния магнитного поля на микротвердость).

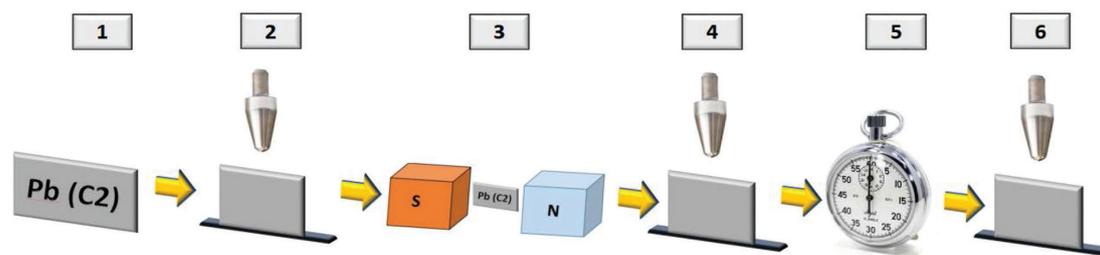


Рис. 1. Схема процедуры микроидентификации образцов свинца после выдержки в магнитном поле

Процедура микроидентирования проводилась на микротвердомере HVS-1000 по Виккерсу [17]. Испытательная нагрузка: 10 г. Время нагружения и под нагрузкой составляло 10 с, время разгрузки 5 с, количество нагружений — 20 (при каждом измерении). Обработка данных по результатам микроидентирования выполнена в программах Excel и Origin Pro 8.

**Результаты и их обсуждение**

В результате проведения испытаний поверхности свинца С2 после выдержки в магнитном поле различной индуктивности были получены закономерности, показывающие характер начального эффекта влияния магнитного поля на микротвердость и параметр

пластичности (рис. 2). Под начальным эффектом подразумеваются значения микротвердости, полученные при измерении сразу после экспозиции образца в магнитном поле.

По полученным данным видно, что наибольшее влияние на микротвердость магнитное поле оказывает в течение первого часа выдержки в магнитном поле при всех значениях магнитной индукции. Дальнейшая выдержка в магнитном поле в течение 2, 3, 4 часов не оказывает существенного влияния на микротвердость свинца. Начальный эффект влияния магнитного поля на микротвердость свинца С2 показывает различный результат в зависимости от величины индукции магнитного поля.

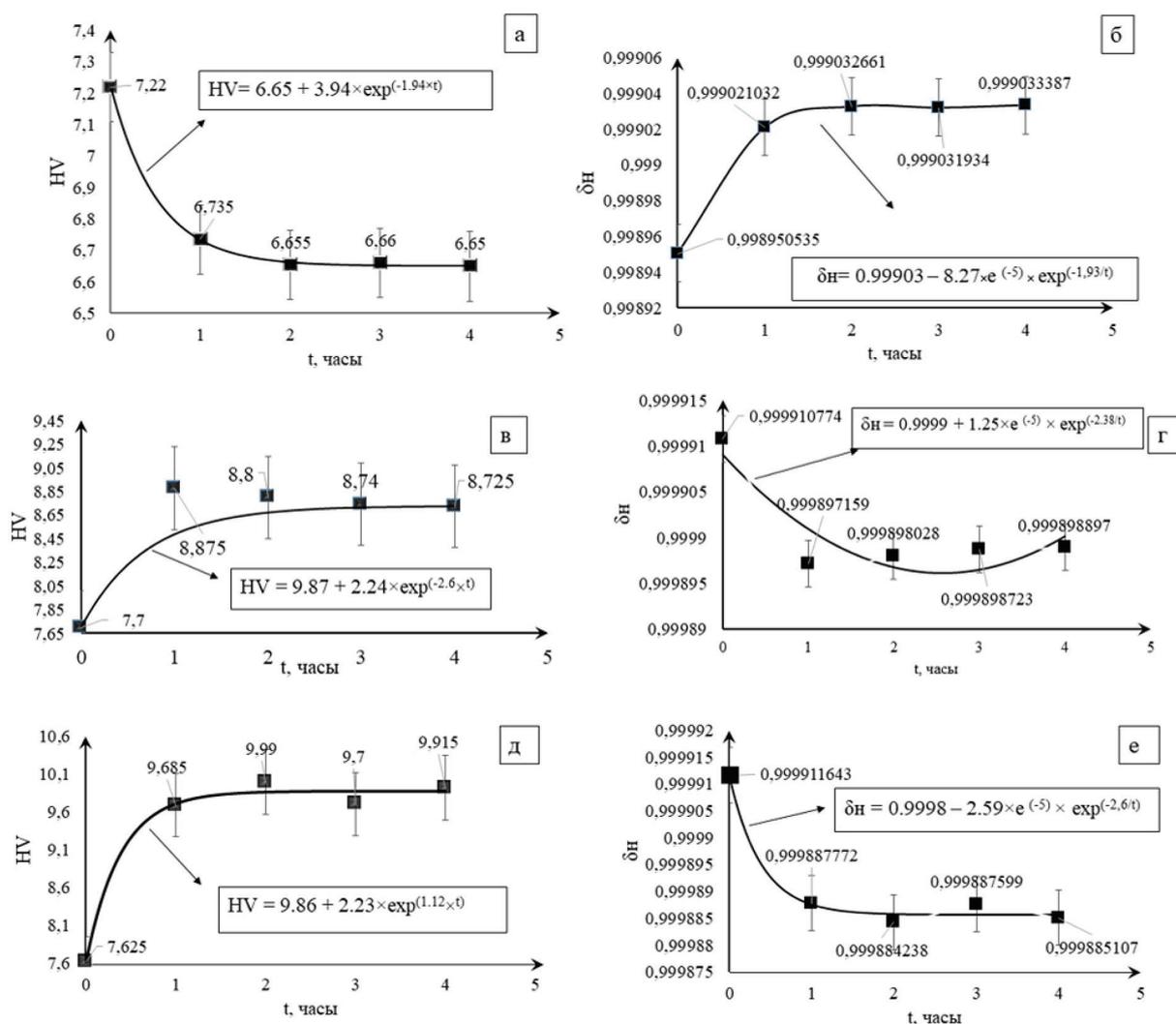


Рис. 2. Начальный эффект изменения микротвердости и параметра пластичности МП 0.3 Тл (а, б), 0.4 Тл (в, г), 0.5 Тл (д, е)

При выдержке в магнитном поле с индукцией 0.3 Тл наблюдается снижение микротвердости. Величина микротвердости до обработки свинца составила

$HV_0 = 7.22$  (точка 1, рис. 2а). В точках 2–5 представлены значения микротвердости, полученные при измерениях сразу после выдержки в магнитном поле в те-

чение 1 часа (точка 2, рис. 2а), 2 часов (точка 3, рис. 2а), 3 часов (точка 4, рис. 2а) и 4 часов (точка 5, рис. 2а). В течение первого часа нахождения образца в магнитном поле (рис. 2а, отрезки 1–2), наблюдается резкое снижение микротвердости до  $HV_1=6.735$  (точка 2, рис. 2а), на 7.8 %. Далее в точках 2–5 не происходит снижения значений микротвердости. В точке 3 (рис. 2а)  $HV_2=6.655$ , в точках 4, 5 значения составили  $HV_3=6.66$  и  $HV_4=6.65$ . Максимальное изменение по сравнению с исходным наблюдается после выдержки в магнитном поле в течение 2 часов,  $HV_2=6.65$  (точка 3, рис. 2а). Таким образом, начальный эффект влияния магнитного поля с индукцией 0.3 Тл выражен снижением прочности свинца.

При выдержке в магнитном поле с индукцией 0.4 Тл наблюдается повышение микротвердости по сравнению с исходной. Величина микротвердости до обработки свинца составила  $HV_0=7.7$  (точка 1, рис. 2в). В точках 2–5 представлены значения микротвердости, полученные при измерениях сразу после выдержки в магнитном поле в течение 1 часа (точка 2, рис. 2в), 2 часов (точка 3, рис. 2в), 3 часов (точка 4, рис. 2в) и 4 часов (точка 5, рис. 2в).

При выдержке в магнитном поле с индукцией 0.5 Тл наблюдается повышение микротвердости по сравнению с исходной. Величина микротвердости до обработки свинца составила  $HV_0=7.625$  (точка 1, рис. 2д). В точках 2–5 представлены значения микротвердости, полученные при измерениях сразу после выдержки в магнитном поле в течение 1 часа (точка 2, рис. 2д), 2 часов (точка 3, рис. 2д), 3 часов (точка 4, рис. 2д) и 4 часов (точка 5, рис. 2д).

На основании зависимостей, приведенных на рисунке 2 (а, в, д), можно сделать вывод, что при всех режимах обработки наибольший эффект оказывается на микротвердость образца в течение первого часа выдержки в магнитном поле.

Известно, что, зная значения микротвердости, можно вычислить параметр пластичности [18]

$$\delta_n = 1 - 14.3 \times (1 - \mu - 2 \times \mu^2) \times HV/E, \quad (1)$$

где  $HV$  — значение микротвердости,  $\mu$  — коэффициент Пуассона исследуемого материала (0.44),  $E$  — модуль Юнга ( $0.17 \times 10^5$ ).

На основании полученных в работе значений микротвердости при выдержке образца в магнитном поле с индукцией 0.3 Тл по формуле (1) вычислены значения параметра пластичности (рис. 2б). Обнаружено, что параметр пластичности обратно пропорционален микротвердости. Параметр пластичности свинца при данном значении индукции увеличился, соответственно, материал стал более пластичным.

Для данных микротвердости, полученных при 0.4 и 0.5 Тл (рис. 2 г, е), также получены значения пара-

метра пластичности. Характер данного значения обратно пропорционален микротвердости. Параметр пластичности при данных режимах обработки снижается.

Обнаружено, что в интервале значений времени выдержки до 1 часа обнаруживается резкое изменение значения микротвердости, измеряемой сразу после экспозиции образца (начальный эффект) с последующей ее релаксацией до исходного значения за время порядка 24 часов. В связи с этим в настоящей работе был расширен диапазон времен обработки. Анализ изменений микротвердости и параметра пластичности в условиях действия магнитного поля проводили для трех значений индукции 0.3, 0.4 и 0.5 Тл и трех времен воздействия 0.25 часа, 0.5 часа, 1 часа.

На основании исследований микротвердости ( $HV$ ) и вычислений параметра пластичности ( $\delta_n$ ) построены зависимости динамики данных величин от времени выдержки (0.25 ч., 0.5 ч., 1 ч.) и значений индукций магнитного поля (0.3 Тл, 0.4 Тл и 0.5 Тл) (рис. 3).

На рисунке 3 показано, что при выдержке образцов свинца в магнитном поле с индукцией 0.3 Тл происходит монотонное снижение микротвердости (рис. 3а) по сравнению с исходным значением (7.22) и повышение параметра пластичности (рис. 3б). Наибольшее влияние на снижение значения микротвердости и повышение параметра пластичности оказывает выдержка в магнитном поле в течение часа.

При воздействии на образцы свинца магнитным полем с индукцией 0.4 и 0.5 Тл происходит повышение значения микротвердости по сравнению с исходным (7.7 и 7.625) и снижение параметра пластичности. Характер изменения значений немонотонный, при выдержке до 0.5 часа происходит максимальный рост микротвердости (рис. 3в, д) и снижение параметра пластичности (рис. 3г, е) по сравнению с исходными значениями. Далее происходит снижение значений. Для оценки эффекта влияния магнитного поля построены гистограммы распределения изменений в процентах (рис. 4).

Рисунок 4 показывает распределение относительного изменения микротвердости при разных значениях индукции магнитного поля. Ранее было установлено, что максимальное влияние на значение микротвердости свинца оказывает магнитное поле с индукцией 0.3 Тл и временем действия 1 час, а при значениях индукции 0.4 и 0.5 Тл максимальные изменения происходят после выдержки образцов в магнитном поле в течение 30 минут.

В ходе исследований установлено, что влияние магнитного поля с индукцией 0.3 Тл на микротвердость свинца С2 выражено снижением микротвердости на 7.2 % (за 1 час обработки произошло снижение с 7.22 до 6.735, красные точки на рис. 3а) по сравнению

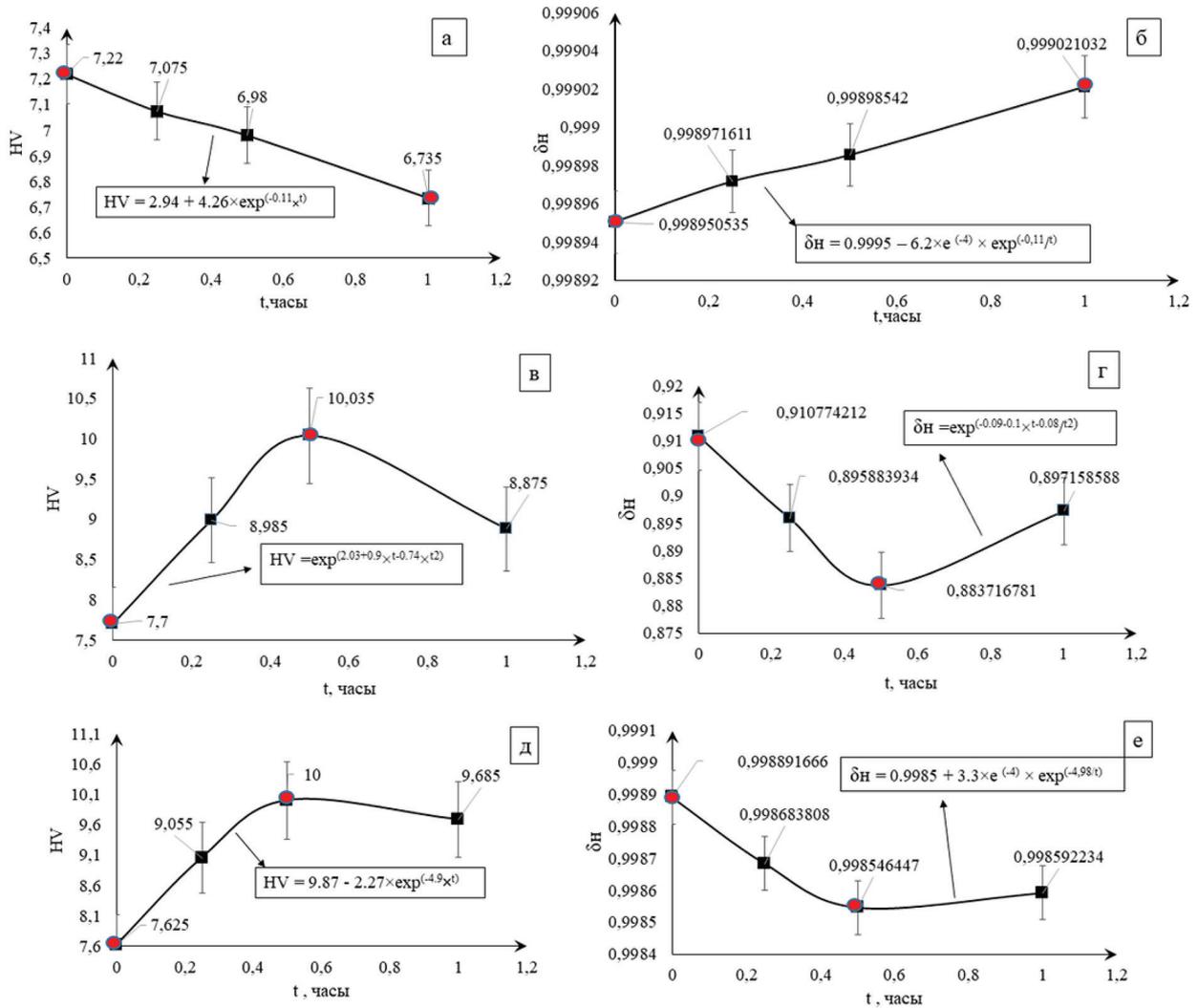


Рис. 3. Динамика микротвердости и параметра пластичности свинца при выдержке в магнитном поле с индукцией 0.3 Тл (а, б), 0.4 Тл (в, г), 0.5 Тл (д, е)

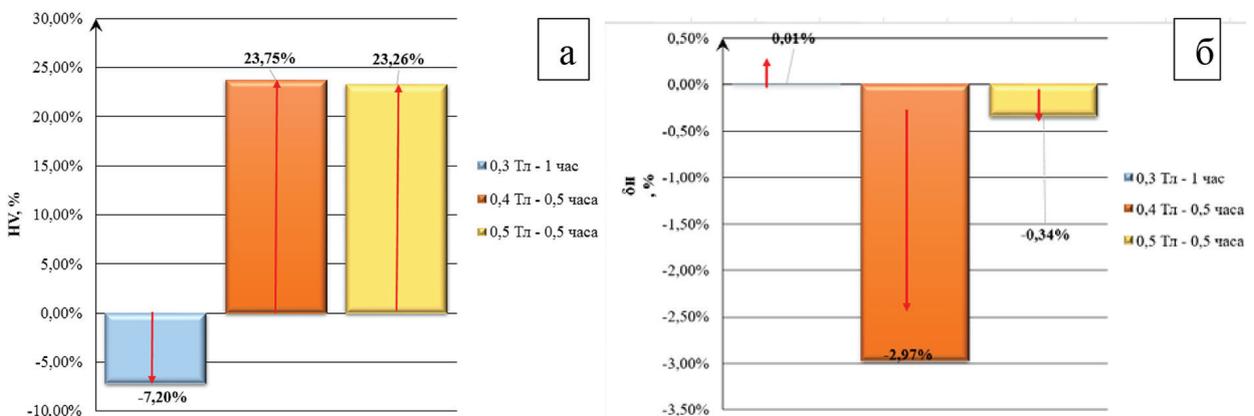


Рис. 4. Распределение относительного изменения микротвердости (а) и параметра пластичности (б) при разных значениях индукции магнитного поля и времени обработки

с исходным значением (рис. 4, голубой столбик гистограммы). Снижение микротвердости может говорить о повышении пластичности материала под воздействием магнитного поля.

Напротив, влияние магнитного поля с индукцией 0.4 Тл и 0.5 Тл на микротвердость свинца С2 выражено повышением значения твердости материала. Микротвердость свинца при воздействии на него магнитного поля с индукцией 0,4 Тл (рис. 4, оранжевый столбик гистограммы) повысилась на 23.75 % (за 30 минут обработки произошло увеличение с 7.7 до 10.035, красные точки на рис. 3в) по сравнению с исходным значением. Значение микротвердости свинца при воздействии на него магнитного поля с индукцией 0.5 Тл (рис. 4, желтый столбик гистограммы) увеличилось на 23.26 % (за 30 минут обработки произошло увеличение с 7.6 до 10, красные точки на рис. 3д) по сравнению с исходным значением.

Максимальный эффект на значение параметра пластичности свинца при выдержке в магнитном поле с индукцией 0.3 Тл достигается в течение 1 часа, а при значениях индукции 0.4 и 0.5 Тл максимальные изменения происходят после выдержки образцов в магнитном поле в течение 30 минут. На рисунке 3 показано, что при обработке в течение 1 часа при индукции магнитного поля 0.3 Тл параметр пластичности незначительно увеличивается (+0.007 %, с 0.998950535 до 0.999021032, красные точки на рис. 3б). Наибольшее снижение параметра пластичности (-2.97 %, с 0.910774212 до 0.883716781, красные точки на рис. 3г) наблюдается при обработке свинца в магнитном поле с индукцией 0.4 Тл при 30 минутах экспозиции образца (оранжевый столбец гистограммы). При обработке свинца с индукцией 0.5 Тл максимальное снижение параметра пластичности (-0.34 %, с 0.998891666 до 0.998546417, красные точки на рис. 3е) достигнуто при времени выдержки 30 минут.

### Заключение

Методом микроидентификации было исследовано влияние магнитного поля на пластические характеристики свинца марки С2. Определен начальный эффект влияния магнитного поля со значениями магнитной

индукции 0.3 Тл, 0.4 Тл и 0.5 Тл на исследуемый материал. Первоначально время выдержки было представлено в виде четырех режимов: 1 режим — выдержка образца в магнитном поле в течение 1 часа; 2 режим — выдержка образца в магнитном поле в течение 2 часов; 3 режим — выдержка образца в магнитном поле в течение 3 часов; 4 режим — выдержка образца в магнитном поле в течение 4 часов. Во время исследования в представленных режимах установлено, что длительность обработки свинца в магнитном поле более 1 часа не приводит к значительным изменениям микротвердости. В связи с этим режимы 2, 3 и 4 являются неоптимальными для исследований и далее не рассматриваются. В связи с установленным фактом расширен диапазон времен выдержки в магнитных полях, дополнительно исследованы два времени выдержки: 15 и 30 минут при всех значениях магнитной индукции.

Максимальное воздействие на динамику микротвердости и параметр пластичности выявлено при индукции магнитного поля 0.3 Тл в условиях выдержки в поле в течение 1 часа, а при индукции 0.4 и 0.5 Тл при выдержке в поле в течение 30 минут.

Таким образом, обнаружен неоднозначный характер динамики микротвердости (HV) и параметра пластичности ( $\delta_{\parallel}$ ); при индукции магнитного поля 0.3 Тл происходит снижение микротвердости и повышение параметра пластичности, при индукции 0.4 Тл и 0.5 Тл наблюдается противоположный характер. Подобный немонотонный характер динамики микротвердости был обнаружен при исследовании динамики микротвердости кристалла NaCl при воздействии магнитного поля [19]. В дальнейшем планируется более подробно изучить влияние магнитного поля на процессы пластической деформации свинца. В настоящий момент уже получены данные о влиянии магнитного поля на свинец при индукции, равной 0.3 Тл, ведется исследование влияния магнитного поля на ползучесть свинца при индукции 0.4 и 0.5 Тл. Затем планируется провести СЭМ и ПЭМ анализ образцов, что позволит получить полную картину влияния слабого магнитного поля на деформационное поведение и морфологию поверхности свинца.

### Библиографический список

1. Ida N. The Static Magnetic Field // In book: Engineering Electromagnetics. 2021. № 377.
2. Gillon P. Uses of intense d.c. magnetic fields in materials processing // Materials Science and Engineering: A. 2000. № 287.
3. Yasuda H., Molokov S., Moreau R., Moffatt K. Applications of High Magnetic Fields in Materials Processing. 2007. № 329. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4833-3\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4833-3_20)
4. Balaji S. Magnetic Fields in Materials. 2020. 355. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2658-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2658-9_5)
5. Papaefthymiou G. Magnetic Fields in Materials. 2022. № 3. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2658-9\\_510.1201/9781315157016-2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2658-9_510.1201/9781315157016-2)

6. Watanabe K., Motokawa M. Materials Science in Static High Magnetic Fields. 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56312-6>
7. Asai S. Application of High Magnetic Fields in Materials Processing // Cheminform. 2006. № 37 (24). <https://doi.org/10.1002/chin.200624224>
8. Краев М., Краева В. Влияние постоянного магнитного поля на сопротивление деформации и упрочнение металлов // Актуальные проблемы прочности : международная научная конференция. Витебск, 2018.
9. Шляров В.В., Загуляев Д.В. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2019.03.016>
10. Краев М. Космические технологии: настоящее и будущее : материалы 6-й Международной конференции ГП КБЮ, Днепр 75. 2017.
11. Misra P. Diamagnetism and Paramagnetism. 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384954-0.00012-8>
12. Pollock D. Diamagnetic and Paramagnetic Effects. 2020. 269. <https://doi.org/10.1201/9781003068082-8>
13. Kadhém M. Ferromagnetism and Antiferromagnetism. 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.4618.1449>
14. Ketterson J. Ferromagnetism and Antiferromagnetism. 2016. № 519. <https://doi.org/54510.1093/acprof:oso/9780198742906.003.0026>
15. Романтеев Ю.П. Metallurgy of heavy colored metals. Lead. Zinc. Cadmium. MISIS. M., 2010.
16. Коновалов С.В. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. № 8.
17. ГОСТ Р 8.748-2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. М., 2013.
18. Мильман Ю.В. Масштабная зависимость твердости и характеристики пластичности, определяемой при индентировании // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 8.
19. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Лопатин Д.В. Обратимые и необратимые изменения пластических свойств кристаллов NaCl, вызванные действием магнитного поля // ФТТ. 1998. № 11.