

# Оценка глубины и степени наклепа при черновой токарной обработке высокомарганцовистой стали



**В. П. Захарова,**  
доцент кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, эл. почта:  
zakharova\_vp@pers.spmi.ru



**Е. Г. Злотников,**  
доцент кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, эл. почта:  
Zlotnikov\_EG@pers.spmi.ru



**М. А. Адмакин,**  
доцент кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, эл. почта:  
Admakin\_MA@pers.spmi.ru



**М. О. Гильвйтинов,**  
студент кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
эл. почта: s210468@stud.spmi.ru

Выполнена оценка степени наклепа и глубины его распространения при черновой токарной обработке высокомарганцовистой стали марки 110Г13Л (сталь Гадфильда). Рассмотрены особые свойства, область применения и проблемы, возникающие при механической обработке стали Гадфильда. Представлены результаты проведенных исследований при черновом наружном точении литой заготовки круглого сечения. Определены оптимальный состав реактива и длительности травления для оценки изменений структуры стали после наклепа; проведен микроструктурный анализ. Выполнена оценка степени упрочнения наклепанного слоя. Исследовано распределение степени наклепа, полученного при черновой токарной обработке по глубине. Полученные результаты позволяют разработать стратегию последующей механической обработки заготовок из стали Гадфильда. Даны рекомендации по выбору методов обработки и металлорежущих инструментов.

**Ключевые слова:** наклеп, деформационное упрочнение, токарная обработка, обрабатываемость резанием, режимы резания, износ инструмента, высокомарганцовистая сталь, микротвердость.

**DOI:** 10.17580/chm.2024.09.11

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

## Введение

Высокомарганцовистые стали, обладающие хорошими показателями по износостойкости, нашли широкое применение для изготовления деталей и оборудования в судостроении [1], военной промышленности, в сфере дорожного и железнодорожного строительства [2–4], горно- [5–7] и газодобывающей отраслях [8] промышленности. Первая подобная сталь была получена английским металлургом Робертом Гадфильдом в 1882 г. При испытании образцов холодной

ковкой обнаружили прямую зависимость степени упрочнения поверхностного слоя от величины пластической деформации. Упрочнение поверхностного слоя деталей из стали Гадфильда (сталь 110Г13Л) обеспечивает высокую стойкость к истиранию, при этом внутренний материал сохраняет хорошую ударную вязкость [9]. Такая уникальная способность выдерживать сильные удары без разрушения позволила впоследствии найти применение стали в изделиях, работающих с большими ударными нагрузками и обычно быстро выходящими из строя по причине истирания [10, 11]. Сталь 110Г13Л применяют при

изготовлении железнодорожных и трамвайных крестовин, зубьев ковшей экскаваторов и карьерных самосвалов, футеровок конусных дробилок, бил роторных дробилок, корпусов шаровых мельниц, гусеничных траков и других изделий [11–13].

Несмотря на то, что эффект упрочнения данной стали при пластической деформации известен около 150 лет, до сих пор не существует единой теории, объясняющей механизм деформационного упрочнения. В ранних исследованиях явление наклепа объясняли превращением аустенитной фазы ( $\gamma$ ) в мартенситную фазу ( $\epsilon$ ). Последние исследования показывают связь деформационного упрочнения с возникновением высокой плотности дислокаций, образованием дислокационных барьеров, препятствующих пластическому движению материала и деформацией двойникованием. Отмечается, что наибольший вклад в упрочнение вносит образование большого числа механических двойников [14–16].

Высокая склонность к наклепу наблюдается не только при пластической деформации заготовок, но и при их механической обработке. Ввиду упрочнения поверхностного слоя на черновых проходах последующая чистовая обработка затруднена [17, 18], а в некоторых случаях — невозможна [19]. Это относится к видам механической обработки, при которых снимаются очень тонкие стружки: протягивание, развертывание, тонкое точение. Вследствие малой глубины резания режущая кромка инструмента работает по наклепанному слою, что приводит к росту сил резания, повышению температуры в зоне резания и существенному снижению стойкости инструмента [20–22]. Подобные условия неизбежно ухудшают качество поверхностного слоя изделия [23, 24].

Одной из важнейших характеристик, определяющих качество поверхности при обработке резанием, является шероховатость [25–27]. Невозможность обеспечения требуемой шероховатости приводит к ухудшению эксплуатационных свойств изделия (снижению коррозионной стойкости, усталостной прочности, контактной жесткости) и товарного вида [28]. Для обеспечения требуемого качества поверхности при механической обработке необходимо учитывать все параметры, влияющие на шероховатость поверхности: скорость, подачу и глубину резания, геометрические параметры сменных многогранных пластин, физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого материалов [29, 30].

При решении задач оценки и прогнозирования состояния поверхностного слоя после механической обработки целесообразно определять показатели, прямо или косвенно отражающие физические процессы, происходящие в материале. К числу таких показателей можно отнести микротвердость, глубину и степень наклепа [31].

Целью работы является определение глубины наклепанного слоя после обдирочной операции заготовки из стали 110Г13Л и оценки степени деформационного упрочнения.

### Материалы и методика исследования

Для оценки распространения наклепа по глубине выбран образец диаметром 80 мм и длиной 200 мм из литой высокомарганцевистой стали 110Г13Л. Химический состав стали

следующий, % (мас.): 11,5–15,0 Mn;  $\leq 1,0$  Ni;  $\leq 1,0$  Cr; 0,9–1,5 C; 0,3–1,0 Si;  $\leq 0,12$  P;  $\leq 0,05$  S.

В ходе эксперимента образец подвергали черновой токарной обработке. Для предотвращения преждевременного затупления режущих кромок токарной пластины глубину резания (4 мм) выбирали из условия необходимости удаления окалина за один проход. По рекомендациям [17, 21] выбрали сменные токарные пластины WNUM 080408 из твердого сплава T5K10 ГОСТ 19048–80 [32], державку DWLNR 2420 2102-0303 и назначили режимы обработки.

Образцы для изучения микроструктуры отрезали абразивным диском с охлаждением для предотвращения наклепа торцевых поверхностей или фазовых превращений вследствие теплового воздействия. После этого образцы шлифовали и полировали.

Информация по выбору составов реактивов для травления стали 110Г13Л немногочисленна [33, 34].

В качестве травителей применили следующие реактивы:

- травитель А — спиртовой раствор соляной кислоты (1 мл HCl, 90 мл  $C_2H_5OH$ );
- травитель Б — спиртовой раствор азотной кислоты (4 мл  $HNO_3$ , 100 мл  $C_2H_5OH$ );
- травитель В — смесь азотной и соляной кислот с глицерином в соотношении 1:1:3.

Размеры зерен определяли при помощи металлографического микроскопа Leica DM ILM HC. Изменение интенсивности наклепа по глубине измеряли микротвердомером ПМТ-3М. По результатам проведенных измерений оценили глубину и степень деформационного упрочнения.

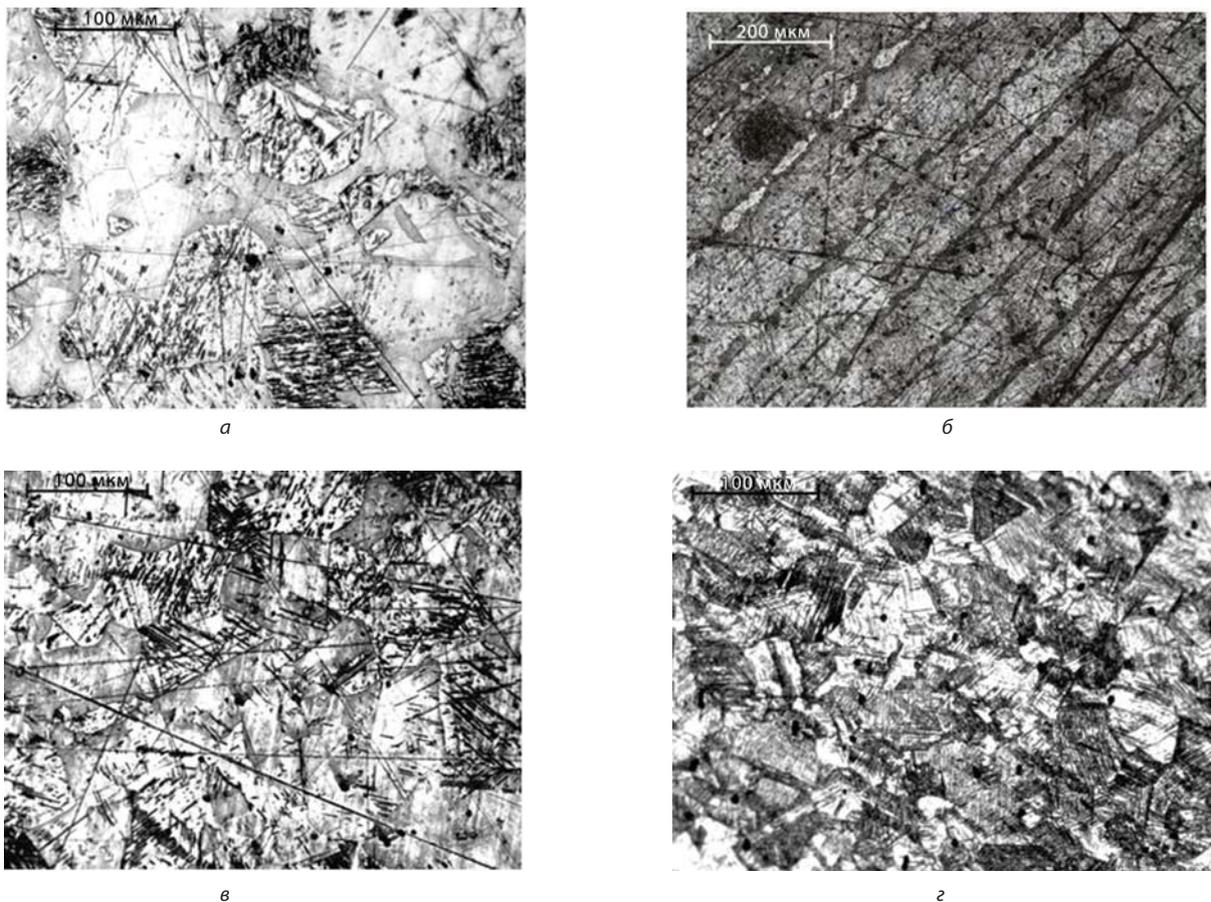
### Результаты исследования и их обсуждение

Наилучший результат по выявлению границ зерен получен у образца, протравленного раствором А. При травлении в течение 30 мин выявлена структура только наклепанного слоя, основной материал остался протравленным. Такой результат можно рассматривать как простой метод определения глубины упрочненного слоя. При травлении в течение 60 мин выявлена структура всей поверхности микрошлифа. На образце отмечены деформирование и переориентирование зерен в упрочненном слое [33].

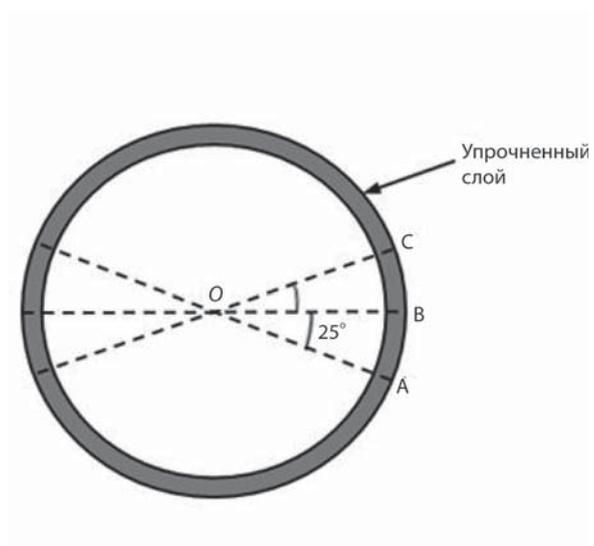
В исходном состоянии структура исследуемого образца представляет собой чистый аустенит (рис. 1, а). После токарной обработки в поверхностном слое наблюдается генерация механических двойников первичного типа (см. рис. 1, б), что подтверждает гипотезу упрочнения вследствие появления механических двойников, приводящих к дроблению и разориентации зерен (см. рис. 1, в, г).

Микротвердость поверхности поперечного сечения образца измеряли по шкале Виккерса вдоль трех радиусов, расположенных через 25 град.: радиус АО — серия измерений № 1, радиус ВО — № 2, радиус СО — № 3 (рис. 2). Расчет выполняли для нагрузки 100 г и длительности выдержки 15 с. Первое значение получили на расстоянии 0,1 мм от края. Дальнейшие измерения проводили с интервалом 0,15 мм.

На цилиндрической образующей провели три серии из 11 измерений напротив соответствующих радиусов. Результаты измерений микротвердости представлены на рис. 3.



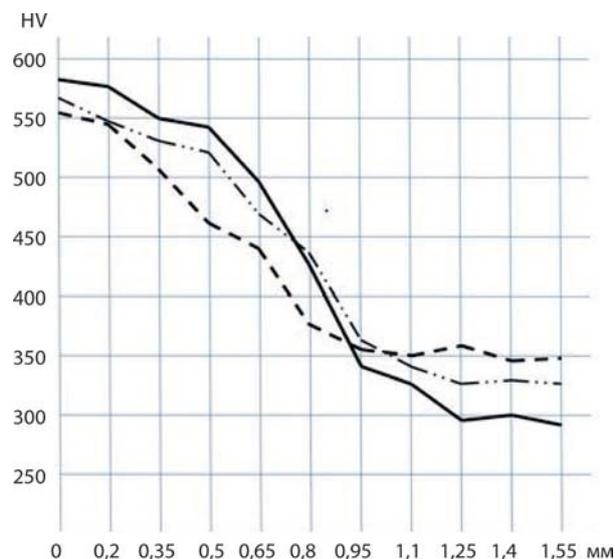
**Рис. 1.** Металлографическое исследование поверхности микрошлифа: а — центральная часть образца, не подвергшаяся пластической деформации; б — система первичного двойникования; в — микроструктура наклепанного слоя с двойниками на расстоянии 1 мм от поверхности; г — микроструктура наклепанного слоя с двойниками на расстоянии 0,1 мм от поверхности



**Рис. 2.** Схема измерения микротвердости поверхности поперечного сечения

Среднее значение твердости поверхности по Виккерсу соответствует 557 HV, на глубине 1,25 мм (ненаклепанный слой) — 321 HV. Степень наклепа составила:

$$U = \frac{U_{\text{нак}} - U_{\text{исх}}}{U_{\text{исх}}} \cdot 100\% = \frac{557 - 334}{334} \cdot 100\% = 66,8\%$$



**Рис. 3.** Изменение микротвердости упрочненного слоя по глубине

Наиболее мелкозернистая структура наблюдается у поверхности, размер зерна соответствует типу G4, с удалением от поверхности происходит увеличение зерна: на глубине от 0 до 0,8 мм — тип G3, на глубине свыше 1,25 мм — G2.

Количественную оценку микроструктуры выполнили по ГОСТ 5639–82 [35], по методу подсчета количества зерен,

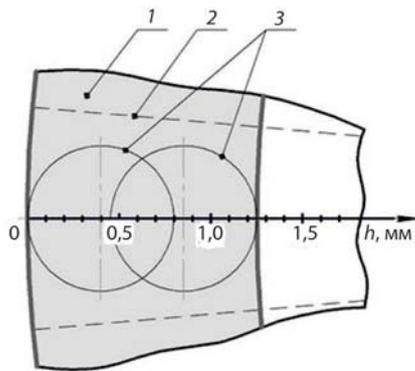
приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерна. Подсчет зерен проводили по микрофотографиям в полях зрения, ограниченных окружностями диаметром 79,8 мм, что соответствует 0,5 мм<sup>2</sup> поверхности шлифа при увеличении ×100 (рис. 4, таблица).

Проведенные исследования наглядно показали, что черновая токарная обработка по литейной корке (обдирка) стали 110Г13Л приводит к формированию мелкозернистой структуры в поверхностном слое, что является причиной деформационного упрочнения.

Дальнейшее изучение условий обрабатываемости высокомарганцовистых сталей предполагает исследования, направленные на оценку глубины наклепанного (дефектного) слоя на этапах полустойковой и чистовой обработки, что необходимо для обеспечения точности и качества поверхностей деталей и выбора более эффективных методов обработки в процессе технической подготовки производства [36, 37].

**Выводы**

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации.



**Рис. 4.** Схема исследуемого участка поверхности микрошлифа: 1 — наклепанный слой; 2 — линии радиусов для измерений микротвердости; 3 — окружности для оценки количества зерен на единицу поверхности; *h* — расстояние от наружной поверхности образца

Выявлена обратная зависимость между увеличением твердости и уменьшением размеров зерна упрочненного слоя; интенсивность наклепа стали 110Г13Л по глубине убывает монотонно.

Черновую токарную обработку рекомендуется производить с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей при скорости резания  $v = 30 \div 35$  м/мин, подаче  $S = 0,1$  мм/об.

Способность стали 110Г13Л приобретать высокую микротвердость при предварительной обработке (557 HV) следует учитывать при последующем назначении режимов и методов обработки, а также геометрических параметров и материала режущих частей инструментов. С учетом наклепа, полученного при черновой обработке, для предохранения режущей кромки инструмента от преждевременного износа необходимо назначать глубину резания больше, чем наклепанного слоя. При необходимости более тонкой обработки, кроме твердосплавных инструментальных материалов, следует рассматривать применение инструментов, оснащенных пластинами со вставками CBN. Вместо финишной токарной обработки желательнее применять операцию шлифования. Виды обработки, предполагающие снятие малых припусков, и при которых используются инструменты из быстрорежущих сталей (протягивание, разворачивание), могут стать крайне затруднительными или невозможными.

Для уменьшения глубины наклепа и достижения благоприятных остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое также предложена финишная магнитно-абразивная обработка, позволяющая увеличить эксплуатационный ресурс техники, работающей в сложных условиях. При обработке заготовок из стали 110Г13Л следует учитывать степень жесткости системы СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь) и при необходимости обеспечивать динамическую стабильность процесса обработки.

**Библиографический список**

См. англ. блок

**Результаты подсчета числа зерен на микрошлифе (×100)**

Номер поля зрения	Расстояние от поверхности, мм	Число зерен		Общее число зерен на площади 0,5 мм <sup>2</sup> $n_{100} = n_1 + 0,5n_2$	Число зерен на 1 мм <sup>2</sup> $m = 2n_{100}$	Средняя площадь зерна $a$ , мм <sup>2</sup> $a = m^{-1}$	Средний диаметр $d_m$ , мм $d_m = m^{-0,5}$
		внутри окружности $n_1$	пересеченных окружностью $n_2$				
1	0–0,8	44	14	$44 + 14 \cdot 0,5 = 51$	$2 \cdot 51 = 102$	0,0098	0,099
2		45	14	$45 + 14 \cdot 0,5 = 52$	$2 \cdot 52 = 104$	0,0096	0,098
3		47	15	$47 + 15 \cdot 0,5 = 54,5$	$2 \cdot 54,5 = 109$	0,0092	0,096
					$m = 105$	0,0095	0,0976
4	0,45–1,25	37	11	$37 + 11 \cdot 0,5 = 42,5$	$2 \cdot 42,5 = 85$	0,0118	0,108
5		37	13	$37 + 13 \cdot 0,5 = 43,5$	$2 \cdot 43,5 = 87$	0,0115	0,107
6		39	14	$39 + 14 \cdot 0,5 = 46$	$2 \cdot 46 = 92$	0,0109	0,104
					$m = 88$	0,0114	0,106
7	1,25–2,05	25	9	$25 + 9 \cdot 0,5 = 29,5$	$2 \cdot 29,5 = 59$	0,0169	0,130
8		27	11	$27 + 11 \cdot 0,5 = 32,5$	$2 \cdot 32,5 = 65$	0,0154	0,124
9		28	12	$28 + 12 \cdot 0,5 = 34$	$2 \cdot 34 = 68$	0,0147	0,121
					$m = 64$	0,0156	0,125

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 72–76  
DOI: 10.17580/chm.2024.09.11

### Evaluation of the depth and degree of work hardening during rough turning of high-manganese steel

#### Information about authors

**V. P. Zakharova**, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>,  
e-mail: zakharova\_vp@pers.spmi.ru;

**E. G. Zlotnikov**, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>,  
e-mail: Zlotnikov\_EG@pers.spmi.ru;

**M. A. Admakin**, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>,  
e-mail: Admakin\_MA@pers.spmi.ru;

**M. O. Gilvitinov**, Student, Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>, e-mail: s210468@stud.spmi.ru  
<sup>1</sup>Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

**Abstract:** The present work is devoted to the study of the depth of the hardened layer and the degree of work hardening during rough turning of high-manganese steel grade 110G13L (Hadfield steel). The work considers the special properties, scope and problems arising during machining of Hadfield steel. The work presents the results of the studies carried out during rough external turning of a cast workpiece with a round cross-section. The optimal composition of the reagent and etching time were determined to assess changes in the structure of steel due to work hardening, and a microstructural analysis was carried out. The degree of hardening of the hardened layer was assessed. The dependence of the degree of hardening obtained during rough turning on the depth was studied. The results obtained make it possible to develop a strategy for subsequent machining of Hadfield steel workpieces. The work provides recommendations on the choice of processing methods and metal-cutting tools.

**Key words:** work hardening; hardening; turning process; machinability; cutting conditions; tool wear; high-manganese steel; microhardness.

#### References

1. Bolobov V. I., Bochkov V. S., Akhmerov E. V. et al. On the influence of surface hardening on the impact-abrasive wear resistance of Hadfield steel. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2020. Vol. 16. No. 6 (186). pp. 252–255.
2. Zagorsky Ya. V., Zagorsky V. K., Kusova I. V. Increasing the durability of intensively wearing parts of road construction machines. *Neftegazovoe delo*. 2016. No. 1. pp. 236–254.
3. Varela L. B., Tressia G., Masoumi M., Bortoleto E. M. et al. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 122. 105295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.
4. Zhukov I. A., Smolyanitsky B. N., Timonin V. V. Improvement of down-the-hole air hammer efficiency by optimizing shapes of colliding parts. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 2, Iss. 54. pp. 212–217. DOI: 10.1134/S1062739118023569.
5. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinik S. Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242, Iss. 2. pp. 228–233. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.228.
6. Kim J. H., Lee M.-K., Jang W., Lee J.-H. Strain behavior of very new high manganese steel for 200,000 m<sup>3</sup> LNG cryogenic storage tank. *Energy*. 2023. Vol. 271. 126889.
7. Admakin M. A., Semenyuk N. A., Pichuzhnikov A. V. Study of the machinability of Hadfield steel by cutting. *The II International Student Scientific and Practical Conference "Scientific Potential of Youth and Technical Progress" 2019*. pp. 34–37. DOI: 10.26160/2618-7493-2019-2-34-37.
8. Jacob R., Raman Sankaranarayanan S., Kumaresh Babu S. P. Recent advancements in manganese steels-A review. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 27. pp. 2852–2858.
9. Marukovich E. I., Usherenko S. M., Andrushevich A. A., Reut O. P., Yazdani-Cherati Javad. Dynamic alloying of high manganese steel. *Foundry production and metallurgy*. 2020. Vol. 2. pp. 69–74. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-2-69-74.
10. Wang Z., Yang Y., Chen C., Li Y. et al. Effect of surface impacting parameters on wear resistance of high manganese steel. *Coatings*. 2023. Vol. 13. 539. DOI: 10.3390/coatings13030539.
11. Nguyen Hong Hai, Nguyen Danh Trung, Pham Mai Khanh et al. Strain hardening of Hadfield high manganese steels. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 66. pp. 2933–2937. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.06.561.
12. Pyatykh A., Savilov A., Timofeev S. Investigation of hadfield steel machinability in milling operations. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910. pp. 123–128. DOI: 10.4028/p-8p4ud2.
13. Bolobov V. I., Akhmerov E. V., Rakitin I. V. Influence of rock type on regularities of excavator bucket tooth crown wear. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022. Vol. 6, Iss. 2. pp. 189–204. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_189.
14. Lychagin D. V., Filippov A. V., Novitskaya O. S., Kolubaev A. V. Determination of sliding and twinning shear stress during microindentation of Hadfield steel single crystals. *Letters on Materials*. 2020. Vol. 10, Iss. 4. pp. 451–456. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-4-451-456.
15. Russakova A. et al. Effect of the dislocation substructure parameters of Hadfield steel on its strain hardening. *Materials*. 2023. Vol. 16, Iss. 4. 1717. DOI: 10.3390/ma16041717.
16. Sun S., Zhao A., Wu Q. Effect of strain rate on the work-hardening rate in high-Mn steel. *Materials Science and Technology*. 2017. Vol. 33, Iss. 11. pp. 1306–1311. DOI: 10.1080/02670836.2017.1288690.
17. Bezazychny V. F. Justification of the feasibility of assigning cutting modes taking into account ensuring the required quality of the material of the part's surface layer. Reference book. *Inzhenerny zhurnal*. 2021. No. 7 (292). pp. 3–17. DOI: 10.14489/hb.2021.07.pp.003-017.
18. Rakunov Yu. P., Abramov V. V., Rakunov A. Yu. Criteria for machinability of difficult-to-machine materials, optimization of tools and cutting modes in precision group production. *Stankoinstrument*. 2021. No. 4 (25). pp. 62–73. DOI: 10.22184/2499-9407.2021.25.4.62.72.
19. Ekici E. Milling behavior of Hadfield steel with cryogenically treated tungsten carbide inserts. *Materialpruefung/Materials Testing*. 2015. Vol. 57, Iss. 11-12. pp. 968–976. DOI: 10.3139/120.110811.
20. Nekrasov R. Yu., Tempel O. A., Vaskov D. E. Determination of optimal cutting conditions when processing difficult-to-machine materials. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskoe nauki*. 2022. No. 4. pp. 484–489. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-484-489.
21. Zellagui R., Hemmouche L., Ait-Sadi H., Chelli A. Effect of element addition, microstructure characteristics, mechanical properties, machining and welding processes of the Hadfield austenitic manganese steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 67, Iss. 3. pp. 863–868. DOI: 10.24425/amm.2022.139676.
22. Artamonov E. V., Vasilega D. S., Tveryakov A. M. Determination of the temperature of maximum performance of throw-away cutting carbide inserts: monograph. Edited by M. Kh. Uteshev. Tyumen: TyumNGU, 2015. 102 p.
23. Duskarava N., Umirzakov D. U., Alizhonova M. M. Stability of the cutting tool and cutting speed. *Sovremennye innovatsii, sistemy i tekhnologii*. 2022. Vol. 2. No. 2. pp. 409–416. DOI: 10.47813/2782-2818-2022-2-2-0409-0416.
24. Akinshin R. N. Technological support of surface quality and cost reduction during blade processing of workpieces from difficult-to-machine materials. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2014. No. 5 (35). pp. 9–13.
25. Maksarov V., Efimov A., Olt J. Improving the quality of hole processing in welded products made of dissimilar materials with a new boring tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 118, Iss. 3. pp. 1027–1042. DOI: 10.1007/s00170-021-07975-7
26. Kulchitskiy A. Optical inspection systems for axisymmetric parts with spatial 2d resolution. *Symmetry*. 2021. Vol. 13, Iss. 7. 1218. DOI: 10.3390/sym13071218
27. Vologzhanina S. A., Igolkin A. F., Peregudov A. A. Research of properties of austenitic steels. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 887. pp. 242–246. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.242
28. Maksarov V. V., Klochkov D. A. Features of the distribution of magnetic induction during magnetic-abrasive processing of synchronizers made of structural alloy steel. *Chernye Metally*. 2023. No. 7. pp. 78–85.
29. Kukharova T. V., Ilyushin Y. V., Asadulagi M.-A. M. Investigation of the OA-300M electrolysis cell temperature field of metallurgical production. *Energies*. 2022. Vol. 15. 9001. DOI: 10.3390/en15239001
30. Kabaldin Yu. G., Laptev I. L., Shatagin D. A., Sery S. V. On-line diagnostics of output parameters of the cutting process based on fractal and wavelet analysis using National Instruments and Nvidia CUDA software and hardware. *Vestnik mashinostroeniya*. 2014. No. 8. pp. 80–82
31. Bezazychny V. F., Szczerek M., Pervov M. L., Timofeev M. V. et al. The study of the effect of temperature on the ability of metals to accumulate energy during their plastic deformation. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 55–59. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.55
32. GOST 19048-80. Hexagon throw-away (indexable) carbide cutting inserts with 80° included angle, with cylindrical holes and chip-breaking flutes. Design and dimensions. Introduced: 01.01.1982.
33. Beckert M., Klemm H. Handbuch der metallographischen Aeverfahren. Translated from Germany. 2<sup>nd</sup> edition, revised and additional. Moscow: Metallurgiya, 1988. 400 p.
34. Kovalenko V. S. Metallographic reagents: reference book. Moscow: Metallurgiya, 1981. 120 p.
35. GOST 5639-82. Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size. Introduced: 01.01.1983.
36. Klevtsov V. A., Timofeev D. Y., Khalimonenko A. D. Improved design of manufacturing processes for mining machines. basing concepts. *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43, Iss. 11. pp. 1367 - 1375. DOI: 10.3103/S1068798X23110151.
37. Schipachev A., Aljadly M., Ganzulenko O., Razzhivin V. et al. Evaluating the effectiveness of magnetic-pulse treatment for healing continuity defects in the metal of oil and gas pipelines. *Metals*. 2023. Vol. 13, Iss. 11. 1875