



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-71-78>
УДК 669.15

Поступила 31.10.2024
Received 31.10.2024

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗЕРНА ПРОКАТА ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 21ХГНМБА НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

С. П. РУДЕНКО, А. Л. ВАЛЬКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sprud.47@mail.ru

Рациональный комплекс механических свойств и высокая прокаливаемость диффузионного слоя обеспечивают применение экономнолегированных сталей для крупномодульных зубчатых колес. Применяемая в настоящее время металлургическими заводами технология изготовления горячекатаного проката цементуемых сталей не обеспечивает стабильного получения в изделиях мелкозернистой структуры. Приведены результаты исследований образцов проката конструкционной экономнолегированной стали 21ХГНМБА, прошедшего термическую обработку по разным технологическим схемам. Установлено, что при одинаковом аустенитном зерне металла прокат двух поставщиков значительно различается по величине действительного зерна. Крупнозернистое строение микроструктуры объясняется особенностями термической обработки проката с длительным замедленным охлаждением при неполном отжиге без перекристаллизации. Получено, что исходная крупнозернистая структура проката повысила склонность к укрупнению зерна изделий при последующей высокотемпературной обработке, что привело к увеличению прокаливаемости стали и повышению кинематической погрешности зубчатых колес, изготовленных из данного проката.

Ключевые слова. Экономнолегированная сталь, горячекатаный прокат, величина зерна, цементуемые зубчатые колеса, накопленная погрешность шага.

Для цитирования. Руденко, С. П. Влияние величины зерна проката экономнолегированной стали 21ХГНМБА на качество изготовления зубчатых колес / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 71–78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-71-78>.

INFLUENCE OF THE GRAIN SIZE OF ROLLED SPARINGLY ALLOYED STEEL ON THE QUALITY OF MANUFACTURE OF GEARS

S. P. RUDENKO, A. L. VAL'KO, S. G. SANDOMIRSKI, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaja str. E-mail: sprud.47@mail.ru

A rational set of mechanical properties and high hardenability of the diffusion layer ensure the use of sparingly alloyed steels for large-module gears. The technology currently used by metallurgical plants for the production of hot-rolled carburized steel does not ensure a stable production of a fine-grained structure in products. The results of studies of rolled samples of sparingly alloyed structural steel 21KhGNMBA, heat-treated according to different technological schemes are given. It has been established that at the same austenitic grain of the metal, rolled products from two suppliers differ significantly in the size of the actual grain. Coarse-grained microstructure structure is explained by peculiarities of heat treatment of rolled products with long delayed cooling at incomplete annealing without recrystallization. It was obtained that the initial coarse-grained structure of rolled products increased the tendency to grain aggregation of products during subsequent high-temperature treatment, which led to an increase in the hardenability of steel and increased kinematic error of gears made of this rolled product.

Keywords. Sparingly alloyed steel, hot-rolled steel, grain size, case-hardened gears, accumulated pitch error.

For citation. Rudenko S. P., Val'ko A. L., Sandomirski S. G. Influence of the grain size of rolled sparingly alloyed steel on the quality of manufacture of gears/Foundry production and metallurgy, 2024, no. 4, pp. 71–78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-71-78>.

Приоритетными направлениями развития современного машиностроения являются полное соответствие продукции своему функциональному назначению и требованиям высокой экономической эффективности, сокращение капитальных и эксплуатационных затрат, рост единичной мощности и производительности, совершенствование конструкционных материалов и снижение материалоемкости машин, повышение надежности и ресурса, внедрение прогрессивных процессов и новых технологий [1]. Эффективным направлением в снижении стоимости материала, уменьшении производственных затрат при изготовлении, а также повышении ресурса высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий мобильных машин является применение экономнолегированных сталей, обеспечивающих повышение качества

поверхностного упрочнения и пределов выносливости материала [2, 3]. Установлено, что экономнолегированные стали могут быть успешно использованы для крупномодульных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин при обеспечении требуемой полосы прокаливаемости и распределения твердости по толщине упрочненного слоя [2]. Отличительная особенность экономнолегированных сталей – их наследственная мелкозернистость, которая сохраняется в структуре при высокотемпературном нагреве в процессе химико-термической обработки. Высокотемпературная цементация обеспечивает сокращение длительности химико-термической обработки и повышает производительность при изготовлении изделий без ухудшения эксплуатационных характеристик деталей, что делает применение экономнолегированных сталей особенно актуальным. Установлено [4], что при температуре цементации 1030 °С и закалке после подстуживания до 850 °С в цементованном слое экономнолегированной стали формируется зерно № 8–9, а в сердцевине – № 7–8, что допустимо по техническим требованиям, предъявляемым к высоконапряженным зубчатым колесам трансмиссий [5].

Производители металлопродукции с целью удовлетворения требований потребителей особое внимание уделяют качеству изготовления проката [6]. Один из показателей качества проката – это величина исходного аустенитного зерна сталей, характеризующая склонность зерна к росту в процессе последующей термообработки [7]. На кинетику роста аустенитного зерна значительное влияние оказывает исходная структура металла, которая может отличаться даже у сталей одинакового марочного состава вследствие влияния условий их выплавки [8].

Цель работы – исследование влияния величины зерна проката экономнолегированной наследственно-мелкозернистой стали на свойства поверхностно-упрочненных крупномодульных зубчатых колес.

На основании применения методического подхода [9] был разработан компонентный состав экономнолегированной стали (см. таблицу) для изготовления зубчатых колес с модулем 7–12 мм трансмиссий большегрузных автомобилей.

Химический состав стали 21ХГНМБА

Состав	Массовая доля элементов, мас. %										
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Al	Cr	Mo	Nb	Ca
Минимальный	0,19	0,17	0,8	0,9	≤0,015	≤0,015	0,02	0,8	0,4	0,05	0,002
Максимальный	0,22	0,37	1,1	1,2			0,04	1,1	0,5	0,08	0,02
Средний	0,205	0,27	0,95	1,05			0,03	0,95	0,45	0,065	0,01

Отличительная особенность разработанной марки стали – наличие ниобия, который за счет образования соединений типа NbX (карбидов, нитридов, карбонитридов) способствует формированию аустенитной структуры с устойчивыми к коалесценции границами зерна [8]. Мелкозернистость сталей с ниобием обеспечивает хорошую пластичность и вязкость диффузионных слоев поверхностно-упрочненных зубчатых колес при их высокой прочности. Введение ниобия, кроме измельчения зерна, способствует устранению химической и структурной неоднородности, разнотерности, а также повышению предела текучести, временного сопротивления разрыву, ударной вязкости и хладностойкости [10].

Опытно-промышленная партия металлопроката из стали 21ХГНМБА была получена от двух производителей: ЧАО «Днепро-спецсталь» (прокат № 1) и ОА «Корпорация Красный октябрь» (прокат № 2). Структурные исследования образцов проката указанной стали проводили на металлографических микроскопах Микро-200 и Epigwant. Металлографические шлифы исследовали после травления по патенту [11] и в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Входной контроль качества проката показал, что микро- и макроструктура, содержание неметаллических включений, величина зерна, твердость материала на образцах из поставленного проката от двух производителей отвечают требованиям ГОСТ 4543-2016 для высококачественной стали и техническим условиям на поставку.

Микроструктура образца проката № 1 производства ЧАО «Днепро-спецсталь» (рис. 1) дифференцированная феррито-перлитная, состоящая из полиэдрического с включениями игольчатого феррита и сорбитообразного перлита. Аустенитное зерно, выявленное методом цементации по ГОСТ 5639-82 (п. 2.1.2), соответствует № 8. Действительное зерно проката, выявленное после травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты, также соответствует № 8 по ГОСТ 5639-82. Твердость проката № 1 составляет 180–205 НВ.

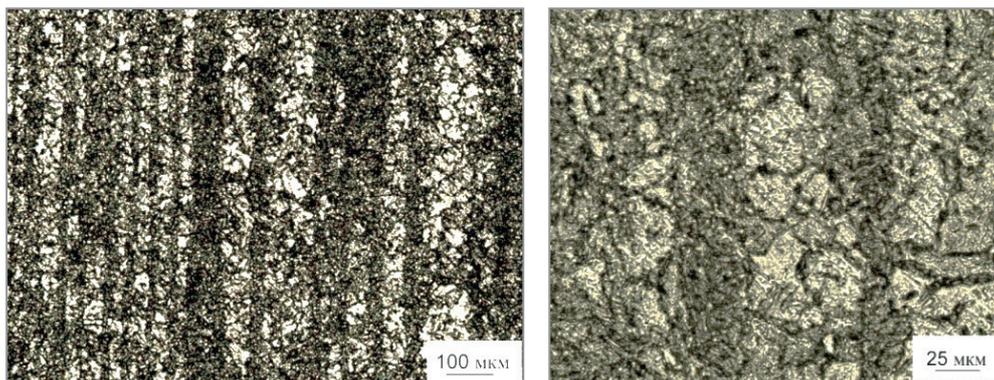


Рис. 1. Микроструктура образца проката № 1 стали 21ХГНМБА производства ЧАО «Днепроспецсталь», травление в 4%-ном растворе азотной кислоты

Микроструктура образца проката № 2 (рис. 2) имеет зернистое строение, скрытопластинчатый перлит 2-го балла по шкале 1 и среднезернистый перлит 5–7-го балла по шкале 2 (ГОСТ 8233-56). Аустенитное зерно, выявленное методом цементации по ГОСТ 5639-82 (п. 2.1.2), соответствует № 8. Действительное зерно, выявленное после травления по патенту № 15273, соответствует № 6 по ГОСТ 5639–82.

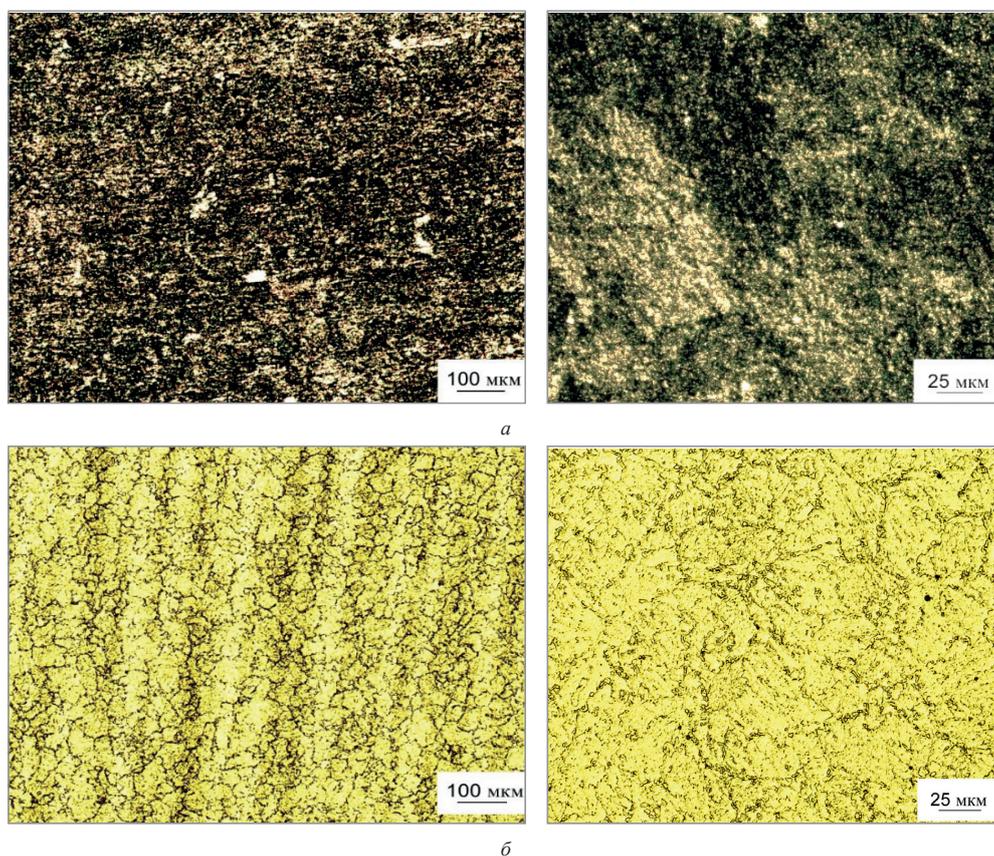


Рис. 2. Микроструктура образца проката № 2 стали 21ХГНМБА:
а – травление в 4%-ном растворе азотной кислоты; *б* – травление по патенту № 15273

Крупнозернистое строение микроструктуры образца проката № 2 объясняется длительным замедленным охлаждением при неполном отжиге без перекристаллизации, что привело к выделению и укрупнению карбидных частиц до 2 мкм. Коагуляция карбидов по границам зерен позволила выявить их границы при травлении в реактиве по патенту № 15273 (рис. 2, *б*).

Отметим, что на металлургических комбинатах выявление границ зерен в прокате осуществляют, например, методом цементации (ГОСТ 5639-82 п. 2.1.2). Это означает, что в сертификатах приводят аустенитное зерно, границы которого выявляют в цементованном слое в виде сетки вторичного цементита после нагрева до температуры 930 °С в среде карбюризатора, выдержки 8 ч и охлаждения до температуры 600 °С с определенной скоростью. Размер аустенитного зерна является технологическим параметром,

характеризующим склонность стали к росту зерна при высокотемпературной выдержке, и является одной из определяющих характеристик при выборе стали.

Другой, не менее важной характеристикой стали, является ее прокаливаемость. Прокаливаемость стали оценивали двумя методами: методом торцевой закалки по ГОСТ 5657–69 и расчетом по программе H-Steel [12]. При изготовлении торцовых образцов для испытаний на прокаливаемость круг проката перековывают в пруток диаметром ~45 мм с последующим отжигом. В результате высокотемпературной деформации и перекристаллизации величина зерна уменьшается. На рис. 3 приведена микроструктура заготовок послековки и отжига торцовых образцов из проката № 1 (а) и из проката № 2 (б). После травления в реактиве по патенту № 15273 выявлено действительное зерно образцов из проката № 1 – №10, а из проката № 2 – № 9. Закалку торцовых образцов осуществляли с температуры 840 °С в струе воды с выдержкой 20 мин.

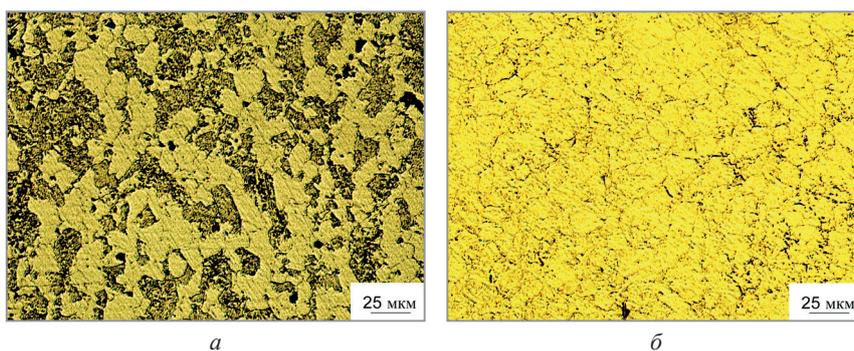


Рис. 3. Микроструктура торцовых образцов проката № 1 (а) и проката № 2 (б), травление по патенту 15273: а – зерно № 10; б – зерно № 9

На рис. 4 приведена прокаливаемость торцовых образцов стали 21ХГНМБА из проката № 1, определенная расчетным методом при среднем химическом составе согласно табл. 1 (кривая 1) при фактическом легировании (кривая 2) в соответствии с сертификатом проката ЧАО «Днепрспецсталь», после торцевой закалки (кривая 3) – по ГОСТ 5657–69. Расчет прокаливаемости выполнен при величине действительного зерна № 10. Из рисунка следует, что результаты расчета прокаливаемости стали 21ХГНМБА совпадают с результатами испытаний на прокаливаемость проката, поставленного ЧАО «Днепрспецсталь». Установлено, что прокаливаемость при фактическом компонентном составе проката значительно ниже прокаливаемости стали со средним содержанием легирующих элементов.

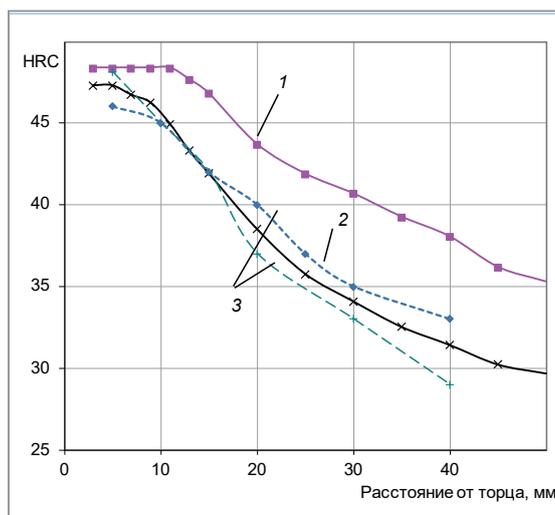


Рис. 4. Прокаливаемость образца стали 21ХГНМБА из проката № 1:
1 – при среднем элементном составе; 2 – при фактическом легировании в соответствии с сертификатом проката ЧАО «Днепрспецсталь»; 3 – после торцевой закалки по ГОСТ 5657-69

На рис. 5 приведена прокаливаемость торцовых образцов стали 21ХГНМБА из проката № 2, определенная расчетным и экспериментальным методами: при среднем химическом составе (кривая 1), при фактическом легировании (кривая 2) в соответствии с сертификатом проката, поставленного ОА «Корпорация

Красный октябрь», после торцевой закалки (кривая 3) – по ГОСТ 5657-69. Расчет выполнен при величине зерна № 9, соответствующему действительному зерну торцовых образцов (см. рис. 3, б). Получено, что прокаливаемость стали 21ХГНМБА с химическим составом, согласно сертификатам завода-изготовителя, ниже прокаливаемости по среднему содержанию легирующих элементов.

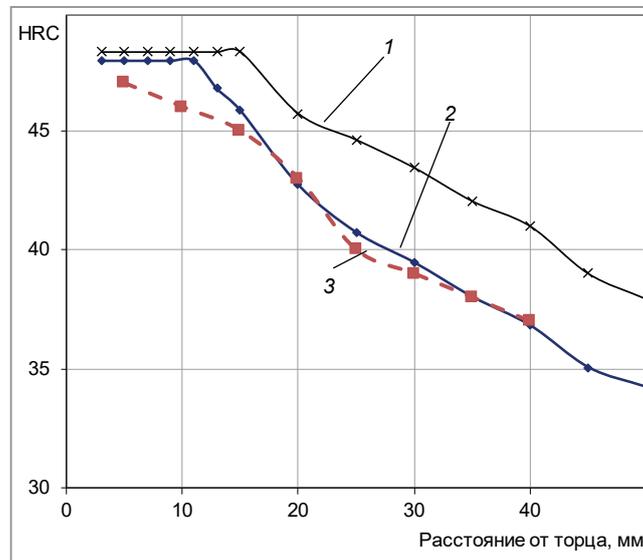


Рис. 5. Прокаливаемость образца стали 21ХГНМБА-В из проката № 2:
1 – при среднем элементном составе; 2 – при фактическом легировании в соответствии с сертификатом проката АО «Корпорация Красный октябрь»; 3 – после торцевой закалки по ГОСТ 5657-69

Сравнение результатов расчета и экспериментальных исследований прокаливаемости проката стали 21ХГНМБА, поставленного ЧАО «Днепрспецсталь» (1) и проката стали 21ХГНМБА-В АО «Корпорация Красный октябрь» (2), приведено на рис. 6. Более высокая прокаливаемость стали производства АО «Корпорация Красный октябрь» объясняется более крупным действительным зерном проката, что обуславливает склонность к укрупнению зерна при последующей термообработке. Применительно к зубчатым колесам крупное зерно проката (№ 6 и менее), способствующее повышению прокаливаемости стали, приводит к повышенной твердости и разнотерности сердцевины. Это негативно сказывается на деформации деталей после ХТО.

Исследовали зубчатые колеса ($m=10$ мм), изготовленные из проката экономнолегированной стали 21ХГНМБА, полученного от двух поставщиков. Установлено, что высокая закалываемость и прокаливаемость диффузионного слоя обеспечивают требования к эффективной толщине высоконапряженных

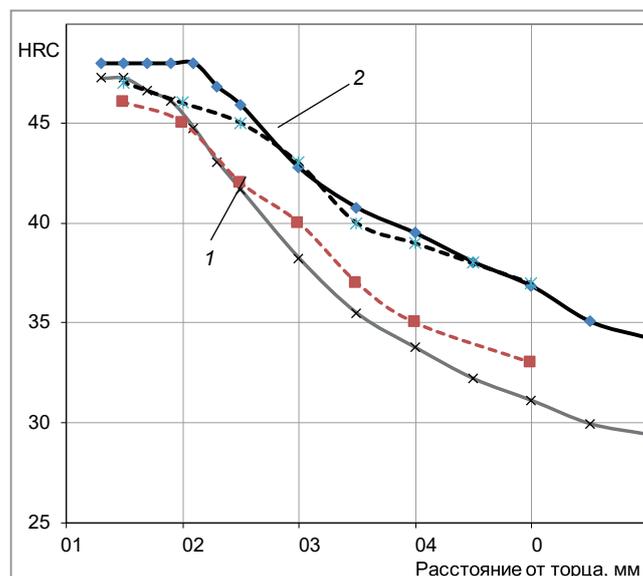


Рис. 6. Прокаливаемость стали 21ХГНМБА: 1 – прокат № 1; 2 – прокат № 2

зубчатых колес согласно ГОСТ 30634-99. Микроструктура цементованного слоя образцов из стали 21ХГНМА после ХТО характеризуется высокой дисперсностью и состоит из мелкоигольчатого мартенсита и одинакового количества остаточного аустенита, не превышающего 25 об.%. Размер действительного зерна в слое № 9 по ГОСТ 5639–65. Твердость сердцевины зубьев составляет 35 HRC и 40–43 HRC соответственно для проката № 1 и № 2. Структура сердцевины зубьев зубчатых колес из проката № 2 – среднеигольчатый мартенсит 4–6-го балла шкалы 3 ГОСТ 8233, разнотернистость № 7–9 (рис. 7).

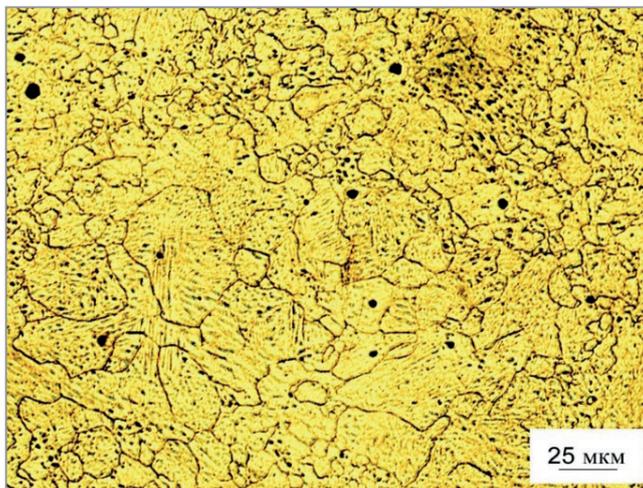


Рис. 7. Структура сердцевины зубьев зубчатых колес из проката № 2

Деформация деталей после ХТО является важной производственной проблемой и влияет косвенным образом на долговечность зубчатых колес [13]. Коробление зубчатых колес после ХТО оценивали по величине допуска на накопленную погрешность шага, являющейся одним из основных показателей кинематической точности, влияющим на равномерность съема припуска при шлифовании разноименных поверхностей зубьев. На рис. 8 приведены результаты определения допуска на накопленную погрешность шага зубчатых колес из стали 21ХГНМБА проката № 1 (21ХГНМБА-1); проката № 2 (21ХГНМБА-2) в сравнении с зубчатыми колесами из стали 20Х2Н4А. Установлено, что величина допуска на накопленную погрешность шага зубчатых колес, изготовленных из стали 21ХГНМБА проката № 2, одинакова с этим показателем для стали 20Х2Н4А и в 2 раза превышает для зубчатых колес, изготовленных из проката № 1. Все исследованные зубчатые колеса проходили ХТО на одном и том же оборудовании в одинаковых условиях.

Полученные результаты показывают, что термическая обработка проката экономнолегированной наследственно-мелкозернистой стали в виде неполного отжига с замедленным охлаждением приводит к формированию неприемлемо крупного действительного зерна, что негативно сказывается на деформации зубчатых колес при высокотемпературной обработке.

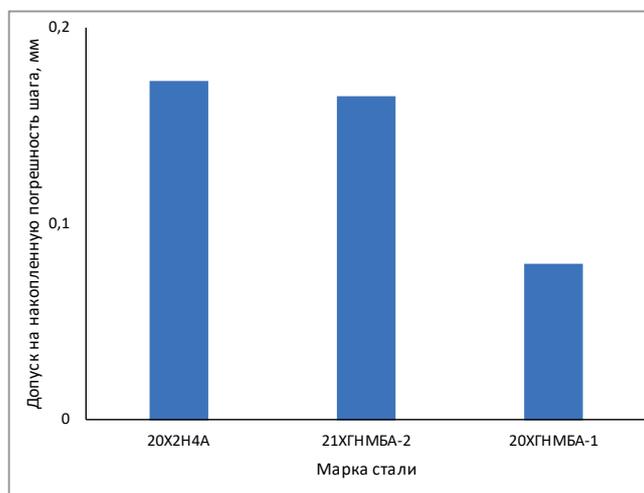


Рис. 8. Допуск на накопленную погрешность шага после ХТО зубчатых колес из сталей 20Х2Н4А, 21ХГНМБА, плавка № 2; из стали 21ХГНМБА, плавка № 1

Таким образом, термическая обработка горячекатаного проката оказывает влияние на его действительное зерно. Укрупнение зерна проката значительно повышает коробление зубчатых колес в процессе их химико-термической обработки, что негативно сказывается на качестве их изготовления и ресурсе в эксплуатации. Контроль аустенитного зерна при производстве проката конструкционных сталей является недостаточным. Результаты проведенных исследований являются основой для разработки дополнительных технических требований по контролю и обеспечению качества изготовления горячекатаного проката экономнолегированных наследственно мелкозернистых сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коновалов, Л. В.** Роль и приоритетные направления конструкционной надежности машин при современных тенденциях развития машиностроения / Л. В. Коновалов // Вестник машиностроения. – 1996. – № 11. – С. 14–18.
2. **Руденко, С. П.** Особенности применения экономнолегированных сталей для крупномодульных зубчатых колес / С. П. Руденко, А. Л. Валько // Сталь. – 2018. – № 8. – С. 54–58.
3. **Руденко, С. П.** Оценка применимости экономнолегированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Вып. 7. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2018. – С. 346–349.
4. **Валько, А. Л.** Влияние вакуумной высокотемпературной цементации на величину зерна конструкционных сталей / А. А. Валько, С. П. Руденко, А. Н. Чичин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Вып. 3. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2014. – С. 343–346.
5. **Руденко, С. П.** Технические требования к качеству цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С. П. Руденко, А. Л. Валько, Е. И. Мосунов // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 9. – С. 33–36.
6. Опыт производства стали марки 4130 с минимальной степенью загрязненности неметаллическими включениями / И. В. Пивцаев [и др.] // Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь: тр. 30-й Междунар. науч.-техн. конф., 16–18 ноября 2022. – Минск, 2022. – С. 118–126.
7. **Ковалева, И. А.** Разработка мероприятий по оптимизации химического состава в цементуемой марке стали 16MnCrS5 для устранения причин возникновения роста крупных аустенитных зерен / И. А. Ковалева, И. А. Овчинникова, С. В. Стефанович // Литье и металлургия. – 2019. – № 1. – С. 49–56.
8. **Ходосовская, Н. А.** Исследование воздействия ниобия на размер зерна аустенита цементуемых сталей при высокотемпературной термической обработке / Н. А. Ходосовская, И. А. Ковалева // Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь: тр. 30-й Междунар. науч.-техн. конф., 16–18 ноября 2022. – Минск, 2022. – С. 79–83.
9. **Руденко, С. П.** Разработка минимально легированной конструкционной стали для крупномодульных зубчатых колес трансмиссий / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 4. – С. 52–59.
10. **Гольдштейн, М. И.** Дисперсионное упрочнение стали / М. И. Гольдштейн, В. М. Фарбер. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
11. Пат. 15273 Респ. Беларусь. МПК С 22 С 38/00 / А. Л. Валько, С. П. Руденко, Е. И. Мосунов, А. И. Михлюк; опубл. 30.12.2011.
12. Расчет прокаливаемости конструкционных сталей (H-Steel): рег. № 846 / С. П. Руденко, О. В. Кузьменков, А. Л. Валько, А. А. Шипко; дата регистр. 12.01.2016.
13. Анализ применения комплексно-легированных сталей для зубчатых колес карьерных самосвалов / С. П. Руденко [и др.] // Механика машин, механизмов, материалов. – 2018. – № 2. – С. 55–60.

REFERENCES

1. **Konovalev L. V.** Rol' i prioritetnye napravleniya konstrukcionnoj nadezhnosti mashin pri sovremennyh tendenciyah razvitiya mashinostroeniya [The role and priority directions of structural reliability of machines in the modern trends in the development of mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 1996, no. 11, pp. 14–18.
2. **Rudenko S. P., Val'ko A. L.** Osobennosti primeneniya ekonomnolegirovannyh stalej dlya krupnomodul'nyh zubchatyh kolez [Feature of application of the economical steel alloy for largely modular gear wheels]. *Stal' = Steel*, 2018, no. 8, pp. 54–58.
3. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Sandomirski S. G.** Ocenka primenimosti ekonomnolegirovannyh stalej dlya vysokonapryazhennyh zubchatyh kolez [Evaluation of the applicability of economically alloyed steels for high-stress gears]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr. = Collection of scientific papers*. Minsk, OIM NAN Belarusi Publ., 2018, vol. 7, pp. 346–349.
4. **Val'ko A. L., Rudenko S. P., Chichin A. N.** Vliyanie vakuumnoj vysokotemperaturnoj cementacii na velichinu zerna konstrukcionnyh stalej [Effect of vacuum high-temperature carburizing on grain size of structural steels], *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr. = Topical issues of mechanical engineering. Collection of scientific papers*, Minsk, OIM NAN Belarusi Publ., 2014, vol. 3, pp. 343–346.
5. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Mosunov E. I.** Tekhnicheskie trebovaniya k kachestvu cementovannyh sloev zubchatyh kolez transmissij energonasyshchennyh mashin [Technical requirements to the quality of cemented layers of gear wheels of transmissions of energy-consuming machines]. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Automotive industry*, 2011, no. 9, pp. 33–36.
6. **Pivcaev I. V., Zazyan A. S., Levotchenko O. L., Konovalenko S. V., Bugrimov A. A.** Opyt proizvodstva stali marki 4130 s minimal'noj stepen'yu zagryaznennosti nemetallicheskimy vkluchenyami [Experience of production of 4130 grade steel with minimal degree of contamination by non-metallic inclusions]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2022. Belarus': trudy 30-j Mezhd. nauch.-tekh. konf. = Foundry production and metallurgy 2022. Belarus: Proceedings of the 30th International Scientific and Technical Conf.* Minsk, 2022, pp. 118–126.
7. **Kovaleva I. A., Ovchinnikova I. A., Stefanovich S. V.** Razrabotka meropriyatij po optimizacii himicheskogo sostava v cementuemoj marke stali 16MnCrS5 dlya ustraneniya prichin vozniknoveniya rosta krupnyh austenitnyh zeren [Development of actions

on optimization of chemical composition of carburized steel grade 16MnCrS5 to eliminate the causes of the growth of large austenite grains]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 1. pp. 49–56.

8. **Hodosovskaya N.A., Kovaleva I.A.** Issledovanie vozdejstviya niobiya na razmer zerna austenita cementcemyh stalej pri vysokotemperaturnoj termicheskoj obrabotke [Investigation of niobium effect on austenite grain size of cement steels during high-temperature heat treatment]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2022. Belarus': trudy 30-j Mezhd. nauch.-tekhn. konf. = Foundry production and metallurgy 2022. Belarus: Proceedings of the 30th International Scientific and Technical Conf. Minsk, 2022*, pp. 79–83.

9. **Rudenko S.P., Val'ko A.L., Sandomirski S.G.** Razrabotka minimal'no legirovannoj konstrukcionnoj stali dlya krupnomodul'nyh zubchatyh koles transmissij [Development of minimally alloyed structural steel for toothed gear wheels of transmissions]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov, materialov = Mechanics of mashins, mechanisms and materials*, 2020, no. 4, pp. 52–59.

10. **Goldstein M.I., Farber V.M.** *Dispersionnoe uprochnenie stali* [Dispersion hardening of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 208 p.

11. **Val'ko A.L., Rudenko S.P., Mosunov E.I., Mihlyuk A.I.** Pat. 15273 Resp. Belarus'. MPK S 23F 1/28, published 30.12.2011.

12. **Rudenko S.P., Kuz'menkov O.V., Val'ko A.L., Shipko A.A.** *Raschet prokalivaemosti konstrukcionnyh stalej (H-Steel)* [Calculation of hardenability of structural steels], reg. № 846; data registr. 12.01.2016.

13. **Rudenko S.P., Sandomirski S.G., Val'ko A.L., Shishko S.A., Karpovich P.G.** Analiz primeneniya kompleksno-legirovannyh stalej dlya zubchatyh koles kar'ernyh samosvalov [Analysis of application of complex-alloyed steels for gear wheels of quarry dump trucks]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov, materialov = Mechanics of mashins, mechanisms and materials*, 2018, no. 2, pp. 55–60.