



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-50-55>  
УДК 539.22

Поступила 29.10.2025  
Received 29.10.2025

## ВЛИЯНИЕ ПОЛОСЧАТОСТИ СТРУКТУРЫ НА АНИЗОТРОПИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ МАРКИ 60ПП

М. И. КРАВЦОВА, Т. И. СИДОРЕНКО, Я. С. КУЛАКОВСКАЯ, Н. В. ЛУТКОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37.  
E-mail: izm.czl@bmz.gomel.by

*Различие механических свойств в отдельных направлениях представляет собой важную проблему, которая проявляется во влиянии на надежность и долговечность изделий, изготавливаемых из стали марки 60ПП, при эксплуатации. Анизотропия механических свойств может значительно ограничивать применение стали представленной марки в ответственных конструкциях. Понимание природы анизотропии и ее влияния на эксплуатационные характеристики металлопродукции позволит в дальнейшем разработать рекомендации по улучшению качества стальных изделий, что особенно важно в условиях современного производства. В данной статье рассмотрено влияние полосчатости феррито-перлитной структуры на различие фактических значений механических свойств, приведено исследование анизотропии механических свойств конструкционной стали марки 60ПП во взаимно перпендикулярных направлениях относительно прокатки.*

**Ключевые слова.** Сталь, сортовой прокат, анизотропия, механические свойства, полосчатость структуры.

**Для цитирования.** Кравцова, М. И. Влияние полосчатости структуры на анизотропию механических свойств стали марки 60ПП / М. И. Кравцова, Т. И. Сидоренко, Я. С. Кулаковская, Н. В. Луткова // *Литье и металлургия*. 2025. № 4. С. 50–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-50-55>.

## INFLUENCE OF BANDED STRUCTURE ON ANISOTROPY OF MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL GRADE 60PP

M. I. KRAVTSOVA, T. I. SIDORENKO, Ya. S. KULAKOVSKAYA, N. V. LUTKOVA, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.  
E-mail: izm.czl@bmz.gomel.by

*Difference in mechanical properties in individual directions is an important problem, which results in the impact on reliability and durability of products made from steel grade 60PP during operation. Anisotropy of mechanical properties can significantly limit the use of steel of the presented grade in critical structures. Understanding the nature of anisotropy and its impact on the performance characteristics of metal products will allow us to develop recommendations for improving the quality of steel products, which is especially important in modern production conditions. This article examines the influence of banding of ferrite-pearlite structure on the difference in the actual values of mechanical properties, and presents study of anisotropy of mechanical properties of structural steel grade 60PP in mutually perpendicular directions relative to rolling.*

**Keywords.** Steel, rolled products, anisotropy, mechanical properties, banded structure.

**For citation.** Kravtsova M. I., Sidorenko T. I., Kulakovskaya Ya. S., Lutkova N. V. Influence of banded structure on anisotropy of mechanical properties of steel grade 60PP. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 4, pp. 50–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-50-55>.

### Введение

Выпуск высококачественной металлопродукции, отвечающей требованиям нормативно-технической документации, а также рациональное использование сырья, топлива и полуфабрикатов в процессе изготовления являются важнейшими задачами современного этапа развития металлургического производства.

В то же время непрерывное совершенствование и развитие новых технологий получения материалов с разнообразными свойствами и возможностью задания требуемых характеристик предполагает более углубленное изучение структурных изменений как на различных стадиях создания конкретного изделия, так и в процессе его эксплуатации [1].

В настоящее время в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» освоено производство сортового проката из конструкционной углеродистой качественной стали марки 60ПП

в горячекатаном и термически обработанном состоянии. Указанный материал широко применяется для производства изделий методом горячей обработки давлением, включая горячую осадку, высадку, штамповку, а также холодную механическую обработку. Сталь 60ПП подходит для изготовления деталей автомобилестроения (например, детали трансмиссии, элементы подвески и др.), работающих в условиях повышенных механических нагрузок и представляет собой надежный материал для производства изделий, требующих высокой прочности и износостойкости, особенно в условиях, где требуется пониженная прокаливаемость и хорошая обрабатываемость.

Принимая во внимание особенности области применения стали марки 60ПП в части требований к обеспечению надежности и долговечности механизмов, важную проблему представляют собой анизотропные свойства, так как они влияют на эксплуатационные характеристики изготавливаемых изделий. Различие механических свойств в отдельных направлениях (анизотропия) может значительно ограничивать применение данной марки стали при производстве ответственных деталей и механизмов.

Актуальность темы обусловлена широким применением стали в различных отраслях, включая строительство, автомобиле- и машиностроение. Понимание природы анизотропии и ее влияния на эксплуатационные характеристики металлопродукции позволит в дальнейшем разработать рекомендации по улучшению качества стальных изделий, что особенно важно в условиях современного производства.

Целью данной работы является исследование анизотропии механических свойств конструкционной стали марки 60ПП в различных направлениях относительно прокатки.

### Литературный обзор

Анизотропия – это свойство материалов, при котором их физические или механические характеристики (например, упругость, прочность, пластичность, ударная вязкость, теплопроводность, электропроводность) зависят от направления измерения. Изотропные материалы в противоположность этому обладают одинаковыми свойствами во всех направлениях.

По структурному признаку различают два основных случая анизотропии, иногда существующих одновременно: гомогенную (обуславливается кристаллическим строением твердых тел) и гетерогенную (волоконистую, строчечную и т.д.), связанную с неоднородностью структуры.

Гомогенная анизотропия проявляется как у макро- и микрогомогенных, так и у гетерогенных структур (монокристаллы, поликристаллы при наличии преимущественных кристаллографических ориентировок текстур и т.д.) [2].

Гетерогенная анизотропия связана с неоднородностью структуры. Ориентированные волокна часто отделены одно от другого другими фазами, например, при наличии карбидной строчечности или неметаллических включений, вытянутых вдоль направлений течения при обработке давлением [2], в том числе полосчатости структуры.

Анизотропия свойств стали при горячей прокатке – это закономерное явление, обусловленное особенностями деформации и формирования структуры в процессе прокатки.

Основными причинами анизотропии стальных изделий при горячей прокатке являются.

**Вытягивание зерен (морфологическая анизотропия).** При прокатке кристаллиты или другие структурные элементы поворачиваются вдоль направления деформации таким образом, что вместо беспорядочной ориентировки зерна в поликристалле приобретают сходную текстуру, что приводит к значительному изменению микроструктуры и, как следствие, к анизотропным свойствам.

**Распределение неметаллических включений и легирующих элементов.** В процессе прокатки неметаллические включения (сульфиды, оксиды и т.д.) и некоторые легирующие элементы вытягиваются в направлении прокатки [2]. Эти включения служат центрами кристаллизации феррита, в результате чего образуется полосчатая феррито-перлитная структура [3]. Авторы [2] отмечают, что это приводит к снижению свойств в поперечном направлении и особенно в направлении через толщину, поскольку включения и сегрегации становятся концентраторами напряжений и облегчают зарождение и распространение трещин.

**Остаточные напряжения.** Горячая прокатка может приводить к возникновению остаточных напряжений в стали, которые могут быть неравномерно распределены по объему и также способствовать анизотропии свойств.

В тех случаях, когда напряженное состояние неизвестно или оно переменное, следует стремиться к уменьшению анизотропии свойств применяемых материалов. На основе имеющихся литературных данных [4], а также производственного опыта можно рекомендовать некоторые пути регулирования анизотропии [2].

1. Применение гомогенизации слитков, которая уменьшает неоднородность их структуры, что, в свою очередь, приводит к снижению анизотропии структуры и свойств обработанных давлением полуфабрикатов [2].

2. Выбор оптимального содержания легирующих добавок в сплавах и их соотношения [2].

3. Повышение чистоты металла по вредным примесям способствует уменьшению неметаллических включений, которые при обработке давлением ориентируются вдоль направления деформации и понижают свойства в поперечном направлении [2].

4. Подбор оптимальных режимов термической обработки полуфабрикатов и изделий. Например, рекристаллизационный отжиг либо полностью устраняет текстуру (при благоприятном содержании примесей добавок), либо в отдельных случаях приводит к образованию нескольких преимущественных кристаллографических ориентировок, влияние которых на анизотропию взаимно компенсируется [2].

5. Для горячедеформированных изделий важную роль играют степень деформации, температурно-скоростные параметры обработки, дробность и направление деформации. Последний фактор особенно важен для катаных изделий. Анизотропия может быть уменьшена в результате правильно проведенной термомеханической обработки, в то же время при неправильных режимах она может оказаться существенной [2].

Несомненно, что путем подбора соответствующих технологических режимов анизотропия механических свойств большинства металлических изделий может быть значительно снижена, если она нежелательна, или отрегулирована в нужном направлении [2].

### Экспериментальная часть

Исследование анизотропии механических свойств изделий из различных металлических сплавов послужило написанию большого количества работ, оценка анизотропии которых выполнялась по результатам испытаний на одноосное растяжение продольных и поперечных образцов, вырезанных из массивных изделий, а также образцов, вырезанных не менее чем в трех направлениях из листового материала, причем полученные результаты отличаются при сравнительном анализе [3].

Для исследования анизотропии механических свойств стали проведены испытания на одноосное растяжение горячекатаных образцов проката диаметром 75 мм стали марки 60ПП производства ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Для проведения испытаний на растяжение были изготовлены образцы, направление продольной оси которых ориентировано под углом 0, 45 и 90° относительно траектории прокатки (рис. 1 [3]). Определение механических свойств проводили на машине для испытаний на растяжение Zwick Roell Z250 в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

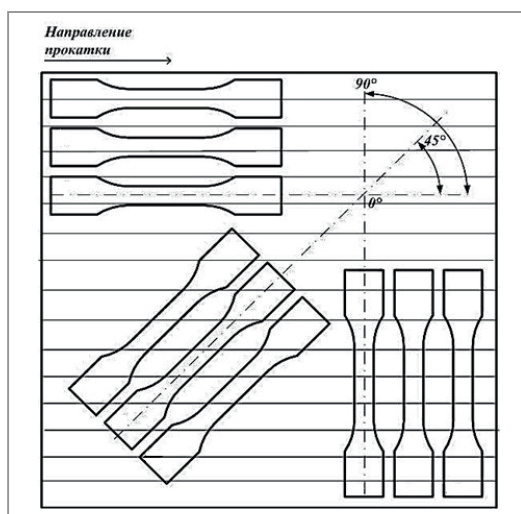


Рис. 1. Схема вырезки образцов для испытаний на одноосное растяжение

Подготовку образцов для исследования микроструктуры осуществляли с помощью автоматической шлифовально-полировальной системы ACCURA 102. Травление выполняли в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте. Металлографическое исследование образцов проводили с использованием инвертированного металлографического микроскопа «NIM 900».

### Результаты испытаний

При испытании на растяжение пропорциональных образцов в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» были определены такие механические свойства, как условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), временное сопротивление разрушению ( $\sigma_B$ ), относительное удлинение ( $\delta$ ) и относительное сужение ( $\psi$ ).

Статистическую обработку результатов эксперимента для исключения ошибочных значений и промахов осуществляли в соответствии с рекомендациями [5].

Средние значения результатов испытаний на одноосное растяжение горячекатаных образцов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1.

| Угол вырезки образца, град | Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Временное сопротивление разрушению $\sigma_B$ , МПа | Относительное удлинение $\delta$ , % | Относительное сужение $\psi$ , % |
|----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 0                          | 341,5                                          | 626,3                                               | 20,0                                 | 34,7                             |
| 45                         | 342,5                                          | 626,6                                               | 17,7                                 | 31,5                             |
| 90                         | 343,0                                          | 625,1                                               | 19,7                                 | 32,8                             |

По результатам испытаний на одноосное растяжение горячекатаных образцов построены графики зависимости механических свойств от ориентировки оси образцов относительно прокатки (рис. 2 а, б).

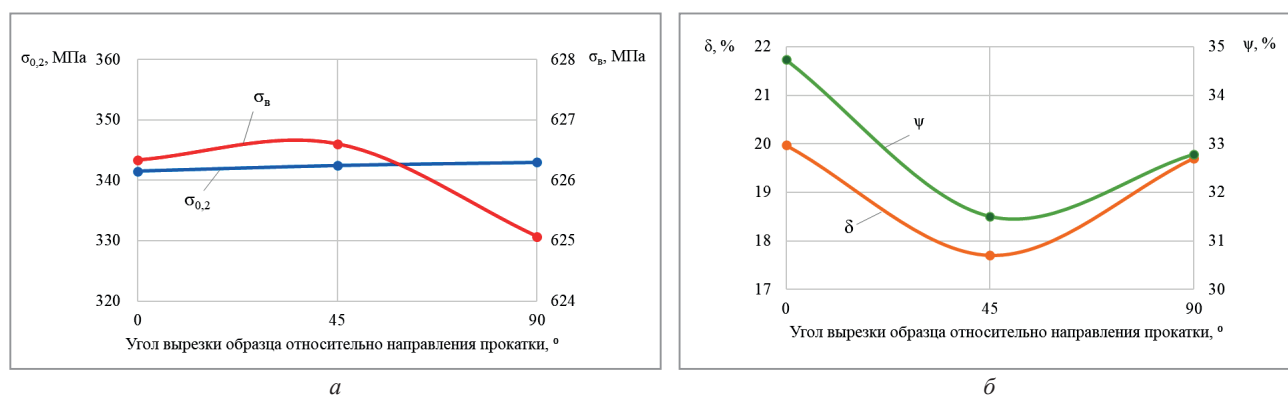


Рис. 2. Зависимость механических свойств от ориентировки оси образцов относительно прокатки:  
а – условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ , МПа) и временное сопротивление разрушению ( $\sigma_B$ , МПа);  
б – относительное удлинение ( $\delta$ , %) и относительное сужение ( $\psi$ , %)

Микроструктура головок пропорциональных образцов, разрушенных после испытаний на растяжение, показана на рис. 3, а–в.

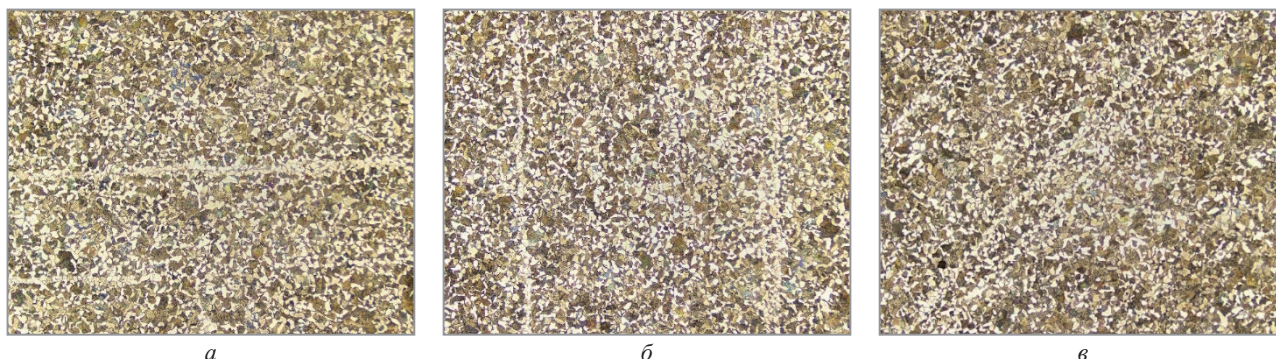


Рис. 3. Микроструктура головок пропорциональных образцов: а – образцы с направлением продольной оси под углом 90° относительно траектории прокатки; б – образцы с направлением продольной оси под углом 0° относительно траектории прокатки; в – образцы с направлением продольной оси под углом 45° относительно траектории прокатки.  $\times 100$

В микроструктуре наблюдается тенденция сохранения ориентировки структуры вдоль направления деформации со сплошными и разорванными полосами из равноосных зерен феррита (феррито-перлитная полосчатость).

### Анализ и обсуждение результатов испытаний

Из табл. 1, а также рис. 2 видно, что механические свойства стали при испытании образцов, вырезанных из прутка вдоль, поперек и под углом  $45^\circ$ , относительно направления прокатки различаются.

Условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и временное сопротивление разрушению ( $\sigma_B$ ) образцов изменяются незначительно и соответственно в данном случае не зависят от направления прокатки. Незначительная анизотропия  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$ , очевидно, обусловлена способом деформации проката, так как в процессе горячей деформации наряду с упрочнением происходит процесс разупрочнения металла путем возврата, полигонизации и рекристаллизации [3].

Относительное удлинение и относительное сужение образцов в зависимости от угла вырезки образцов относительно прокатки, напротив, имеют отличные друг от друга значения. Так, наибольшие значения  $\delta$  и  $\psi$  присущи образцам, направление продольной оси которых ориентировано под углом  $0^\circ$  относительно траектории прокатки. Наименьшая пластичность материала наблюдается под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки, надо полагать по причине значительного упрочнения материала, обусловленного совпадением направления волокна с максимальными касательными напряжениями в процессе испытания на растяжение [3], следовательно, в данном случае основное влияние оказывает феррито-перлитная полосчатость.

Предел прочности образцов с углом ориентации оси относительно направления прокатки  $0^\circ$  выше, чем у образцов с углом ориентации оси относительно направления прокатки  $90$  и  $45^\circ$  ввиду того, что ориентированные вдоль направления деформации неметаллические включения (сульфиды), являющиеся центрами кристаллизации феррита и, следовательно, выступающие одним из факторов формирования феррито-перлитной полосчатости, имеют наименьшее влияние на статическую прочность в данном направлении.

Зависимость свойств материала от направления оказывает определенное влияние на технологические процессы изготовления изделий. Однако, для того чтобы оценить влияние анизотропии, в технологических расчетах необходимо использовать показатели, количественно характеризующие анизотропию свойств [6].

Степень анизотропии свойств материалов количественно выражается через отношение значений одного и того же свойства, измеренных в разных направлениях, к его среднему значению. Формула для вычисления степени анизотропии зависит от конкретного свойства и типа анизотропии, но в общем виде может быть представлена как отношение максимального и минимального значения этого же свойства, измеренного в перпендикулярных направлениях, или как отношение разности максимального и минимального значения этого же свойства, измеренного в разных направлениях, к среднему значению. Выбор конкретной формулы для расчета степени анизотропии зависит от конкретного свойства и типа анизотропии, а также от поставленной задачи.

Коэффициент анизотропии механических свойств стали 60ПП во взаимно перпендикулярных направлениях (под углами  $0$  и  $90^\circ$  относительно траектории прокатки) рассчитывали по формуле:

$$A = S_1 / S_2, \quad (1)$$

где  $S_1$  – среднее значение параметра в одном направлении;  $S_2$  – среднее значение этого же параметра, измеренного в перпендикулярном направлении.

Коэффициенты анизотропии механических свойств во взаимно перпендикулярных направлениях (под углами  $0$  и  $90^\circ$  относительно траектории прокатки) приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2.

| Марка<br>стали | Механические<br>свойства | Угол вырезки образца, град |       | Коэффициент анизотропии<br>механических свойств |       | Отклонение от<br>изотропного<br>состояния, % |
|----------------|--------------------------|----------------------------|-------|-------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|
|                |                          | 0                          | 90    |                                                 |       |                                              |
|                |                          | среднее значение величины  |       |                                                 |       |                                              |
| 60ПП           | $\sigma_{0,2}$ , МПа     | 341,5                      | 343,0 | $A\sigma_{0,2}$                                 | 1,004 | 0,44                                         |
|                | $\sigma_B$ , МПа         | 626,3                      | 625,1 | $A\sigma_B$                                     | 0,998 | 0,20                                         |
|                | $\delta$ , %             | 20,0                       | 19,7  | $A\delta$                                       | 0,987 | 1,33                                         |
|                | $\psi$ , %               | 34,7                       | 32,8  | $A\psi$                                         | 0,944 | 5,61                                         |

Коэффициент анизотропии в контексте деформации указывает на то, насколько отличаются свойства материала в разных направлениях. Если коэффициент равен 1, то материал изотропен, и механические свойства одинаковы по всем направлениям. Если коэффициент больше или меньше 1, то это значит, что материал анизотропен по исследуемым направлениям на величину отклонения от изотропного состояния (табл. 2).

## Выводы

1. Рассмотрено понятие анизотропии.
2. Проанализированы и выявлены параметры, оказывающие влияние на проявление анизотропии механических свойств в стали.
3. В результате экспериментального исследования (испытание на растяжение) горячекатаных образцов выявлено различие механических свойств сортового проката вдоль, поперек и под углом  $45^\circ$  относительно направления прокатки.
4. В ходе металлографического исследования головок пропорциональных образцов, разрушенных после испытаний на растяжение, выявлена неоднородность структуры – феррито-перлитная полосчатость.
5. Рассчитаны коэффициенты анизотропии механических свойств горячекатаных образцов стали марки 60ПП во взаимно перпендикулярных направлениях (под углами  $0$  и  $90^\circ$  относительно траектории прокатки). Рассчитанные коэффициенты анизотропии условного предела текучести ( $A\sigma_{0,2}$ ) и временного сопротивления разрушению ( $\sigma_b$ ) указывают на изотропию указанных выше механических свойств во взаимно перпендикулярных направлениях. Пластичность же в перпендикулярном направлении относительно траектории прокатки меньше, чем в продольном (коэффициенты анизотропии  $A_\delta$  и  $A_\psi$  меньше 1).
6. Причинами различия механических свойств горячекатаного сортового проката стали марки 60ПП вдоль, поперек и под углом  $45^\circ$  относительно направления прокатки является способ деформации и наличие феррито-перлитной полосчатости структуры, которая, в свою очередь, зависит от термической обработки проката, количества и морфологии неметаллических включений в стали. Важно отметить, что наличие в структуре феррито-перлитной полосчатости в большей степени ухудшает весь комплекс механических характеристик стали, делая ее менее надежной и долговечной в эксплуатации по причине неоднородности свойств в различных направлениях.

В дальнейшем планируются исследование анизотропии механических свойств горячекатаной и отожженной стали различного марочного состава в отличных направлениях относительно прокатки, расчет коэффициента анизотропии механических свойств во взаимно перпендикулярных направлениях (под углами  $0$  и  $90^\circ$  относительно траектории прокатки) и сравнительный анализ анизотропии механических свойств горячекатаных и отожженных образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Большаков, В.И.** Атлас структур металлов и сплавов / В.И. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Д.В. Лаухин. – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2010. – 174 с.
2. **Фридман, Я.Б.** Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. – 3-е изд. в 2-х ч. Ч. 1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
3. **Осипок, Т.В.** Оценка анизотропии механических свойств листового проката из углеродистой стали / Т.В. Осипок, С.А. Зайдес // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 24. – № 5. – С. 1007–1018.
4. **Микляев, П.Г.** Анизотропия механических свойств материалов / П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. – М.: Металлургия, 1969. – 268 с.
5. Основы научных исследований. Математическое моделирование технических процессов. В 2-х ч. / Г.Ф. Протасевич [и др.]. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 1. – 92 с.
6. **Гречников, Ф.В.** К расчету среднего значения коэффициента анизотропии листовых материалов / Ф.В. Гречников, Я.А. Ерисов, В.М. Зайцев // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 154–157.

## REFERENCES

1. **Bol'shakov V.I., Suhomlin G.D., Lauhin D.V.** *Atlas struktur metallov i splavov* [Atlas of Metal and Alloy Structures]. Dnepropetrovsk, GVUZ "PGASA" Publ., 2010, 174 p.
2. **Fridman Ja.B.** *Mehanicheskie svojstva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 472 p.
3. **Osipok T.V., Zajdes S.A.** *Ocenka anizotropii mehanicheskikh svojstv listovogo prokata iz uglerodistoj stali* [Evaluation of the anisotropy of mechanical properties of carbon steel sheet products]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 1007–1018.
4. **Mikljaev P.G., Fridman Ja.B.** *Anizotropija mehanicheskikh svojstv materialov* [Anisotropy of mechanical properties of materials]. Moscow, Metallurgija Publ., 1969, 268 p.
5. **Protasevich G.F.** *Osnovy nauchnyh issledovanij. Matematicheskoe modelirovanie tehničeskikh processov* [Fundamentals of Scientific Research. Mathematical Modeling of Technical Processes]. Minsk, BNTU Publ., 2009, vol. 1, 92 p.
6. **Grechnikov F.V., Erisov Ja.A., Zajcev V.M.** *K raschetu srednego znachenija koeficienta anizotropii listovykh materialov* [Calculating the average anisotropy coefficient of sheet materials]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no.4, vol. 16, pp. 154–157.