

7. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Модификация свойств поверхностных слоев тяжело нагруженных деталей горных машин посредством плазменного упрочнения. – Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Вип.32. Кривий Ріг, 2012. – с.123-127.

8. Mohd Idris Shah Ismail, Zahari Taha. Surface Hardening of Tool Steel by Plasma Arc with Multiple Passes/ International Journal of Technology, 2014. – Vol. 5 No 1. - p.79-87

9. Kazuhiro Yagita, Chikara Ohki. Plasma Nitriding Treatment of High Alloy Steel for Bearing Components/ NTN Technical Review, 2012. - No.78. –p. 33-40.

10. Yang, L.J. Plasma Arc Surface Hardening of ASSAB 760 Steel Specimens with Taguchi Optimization of the Processing Parameters, Journal of Material Processing Technology, 2001. - Vol. 113, p. 521-526

Рукопись поступила в редакцию 16.03.15

УДК 69.057.693: 624

А.В. ПАРШИН, С.А. ХАРЧЕНКО, В.И. АСТАХОВ, кандидаты техн. наук, доц.,
И.В. ГИРИН, ст. преподаватель, С.А. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф.
Криворожский национальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ

Представлены результаты исследования сопротивляемости фундаментных болтов хрупким разрушениям для элементов болтовых соединений фундаментов, которые были выполнены из разных марок стали и имели различную конфигурацию. На основании анализа низкотемпературных диаграмм, полученных в результате исследований, было установлено, что разрушающие напряжения для фундаментных болтов, соответствующие температуре вязко-хрупкого перехода, во всех случаях - на 10-20% выше, чем при температуре +20°C. Этот результат предопределен ограничением нижней границы эксплуатационной пригодности фундаментных болтов температурой вязко-хрупкого перехода. Установлено, что в качестве материала для фундаментных болтов диаметром до 48 мм, эксплуатируемых в климатических районах с расчетной температурой до -65°C, можно использовать сталь марки 09Г2С-6, а в климатических районах с расчетной температурой до -50°C – сталь марки ВСтЗ или ВСтЗГ с дополнительным требованием по ударной вязкости при температуре -20°C не менее 30 Дж/см². Результаты экспериментальных исследований позволили разработать предложения по повышению расчетных сопротивлений фундаментных болтов растяжению.

Ключевые слова: фундамент, болт, хрупкое разрушение, сопротивляемость, соединение.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Исследование сопротивляемости фундаментных болтов хрупким разрушениям для позволяет установить разрушающие напряжения, соответствующие температуре вязко-хрупкого перехода. Очевидно, что при установлении количественных показателей сопротивления хрупким разрушениям целесообразно рассматривать диаграммы деформирования элементов болтовых соединений, что позволит более адекватно рассчитывать крепления металлоконструкций к фундаментам.

Анализ исследований и публикаций. Отмеченный подход был использован в исследованиях Беляева С.В., Биргера И.А., Горпинченко В.М., Григорьева В.Н., Ивашкова И.И., Каленова В.В., Кармалина В.В., Кочерговой Е. Е., Мацелинского Е.Р., Павлова А.Б., Стрелецкого Н.Н., Трофимова В.И. Иоселевича Г.Б. и др. [1-6]. Из них следует: чтобы решить задачи, поставленные в данном контексте, необходимо для каждого образца иметь полную информацию о деформациях на всех этапах нагружения. Так как диаграмму деформирования нельзя строить без анализа особенностей разрушения болтового соединения, то окончательно в качестве расчетных сопротивлений хрупкому разрушению принимаются величины, вычисленные по деформационному критерию.

Постановка задания. Анализ исследований хрупкого разрушения элементов болтовых соединений из сталей повышенной и высокой прочности, а также сопоставление требований отечественных и зарубежных норм проектирования показал, что применяемые формулы недостаточно точны, поэтому нуждается в уточнении, что и обусловило направление и содержание представленного исследования: построение и анализ диаграмм деформирования до хрупкого разрушения элементов фундаментных болтовых соединений.

Изложение материала и результаты исследования. Характерной особенностью разрушения образцов фундаментных болтов, испытанных при положительной температуре и при отрицательной, выше критической, являлось то, что во всех случаях в местах разрушения наблюдались значительные пластические деформации. В указанных температурных границах поперечное сужение в изломе достигало 30-40%.

Волокнистый излом, который является характерной особенностью вязкого разрушения, имели все образцы, испытанные при температуре выше -40°C . Поверхность излома в этом случае была покрыта выступами удлиненной формы, представляющими собой разрушенные зерна феррита и выглядела матовой. Дальнейшее снижение температуры испытаний привело к тому, что в изломах, помимо волокнистой составляющей, появились фасетки скола. Анализ изломов, содержащих волокнистую и кристаллическую составляющие, позволяет сделать вывод о том, что зарождение разрушения происходит по механизму вязкого сдвига. После того, как вязкая трещина достигает длины, соответствующей критической, распространение разрушения происходит по механизму квазихрупкого скола. При снижении температуры испытаний и приближении ее к критической наблюдался рост разрушающей нагрузки. При этом деформационные параметры разрушения оставались неизменными.

При температуре испытаний, равной и ниже $T_{кр}$, поверхность излома образцов имела характерный кристаллический блеск и была ориентирована перпендикулярно действию главных растягивающих усилий. Все изломы содержали только фасетки скола. Поперечное сужение в изломе снижалось до 3-5%. Кроме того, наблюдалось снижение разрушающей нагрузки, которая при температуре испытаний -125°C для всех серий образцов равнялась их несущей способности при $+20^{\circ}\text{C}$.

Установлено, что при температуре испытаний выше $T_{кр}$ болты во всех случаях разрушались на свободном участке резьбы. При температурах ниже $T_{кр}$ разрушение происходило либо в сечении опорной поверхности гайки, либо в месте перехода резьбы к гладкому стержню. Таким образом, анализ участков разрушения фундаментных болтов показывает, что при понижении температуры ниже критической, наблюдается переход места разрушения от зоны с меньшей концентрацией напряжений (свободный участок резьбы) к зоне с большей концентрацией (сечение опорной поверхности гайки или место перехода резьбы к гладкому стержню) [7, 8].

На основании исследований установлено, что при положительной температуре наличие малых перекосов (до 10°) не влияет на несущую способность болтов из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Этот результат нельзя автоматически перенести на случай эксплуатации болтов при низких температурах. Дело в том, что даже малые перекосы вызывают перенапряжение отдельных участков резьбы, что может привести к инициированию хрупкого разрушения. В связи с этим на первом этапе были проведены специальные исследования по изучению влияния перекосов на хладостойкость болтов, для чего было испытано, четыре серии образцов болтов из малоуглеродистой стали ВСтЗпс (серии БФ-5, БФ-6) и низколегированной стали 09Г2С (серии БФ-7, БФ-8). Серии БФ-5 и БФ-7 испытывались на центральное растяжение, а серии БФ-6 и БФ-8 - на растяжение с изгибом.

Изучение материалов о точности монтажа конструкций, а также результатов обследований объектов [9,10] показало, что болты работают с перекосом, не более 10° . На основании этого для моделирования перекоса применялись косые шайбы с уклоном 10° , изготовленные из термически обработанной стали 40Х. Применение косых шайб рекомендуется для контроля качества крепежных изделий ответственного назначения в машиностроении.

Результаты экспериментальных исследований (табл. 1) показали, что переход от центрального растяжения к растяжению с изгибом обуславливает сдвигку критической температуры в сторону положительных температур на 10°C для малоуглеродистой стали (рис. 1) и на 5°C для низколегированной стали (рис. 2а). На основании этого все последующие низкотемпературные испытания проводились на растяжение с изгибом.

Как известно, масштабный эффект является одним из наименее изученных факторов, способных изменить при отрицательных температурах характер разрушения элемента. Увеличение геометрических размеров элемента имеет многочисленные последствия [11, 12]:

- ухудшение структуры материала за счет увеличения количества внутренних дефектов;
- значительное увеличение потенциальной энергии упругой деформации;
- изменение характера напряженного состояния вблизи концентратора напряжений.

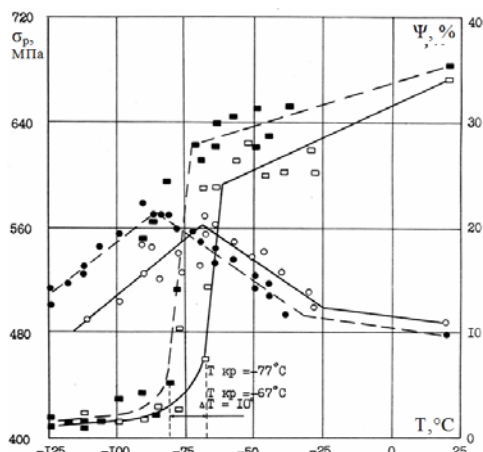


Рис. 1. Температурные зависимости силовых и деформационных характеристик разрушения образцов фундаментных болтов М30 из стали ВСтЗпс серий БФ-5 (● – разрушающие напряжения при осевом растяжении; ○ – разрушающие напряжения при растяжении с изгибом) и БФ-6 (■ – относительное сужение при осевом растяжении; □ – относительное сужение при растяжении с изгибом)

Для изучения влияния масштабного фактора на величину критической температуры вязко-хрупкого перехода болтов были испытаны образцы из малоуглеродистой стали ВСтЗпс серий БФ-5, БФ-9, БФ-10 с диаметром стержня соответственно 30, 36 и 48 мм, которые применяются наиболее широко. С целью обеспечения возможности сопоставления результатов испытаний круглый прокат для изготовления образцов подбирался с близкой величиной порогов хладноломкости $T_{кр}$, которая определялась по результатам контрольных испытаний стандартных образцов на ударную вязкость и составляла для сталей образцов серий БФ-5, БФ-9, БФ-10, соответственно -33°C , -36°C и -38°C (табл. 1).

На основании результатов исследований установлено, что изменение диаметра болта в пределах от 30 до 43 мм практически не сказывается на критической температуре вязко-хрупкого перехода. Доказательством служит то, что для болтов М30, М36, М48 она составила соответственно -67°C , -75°C и -64°C (рис. 1, 2Б).

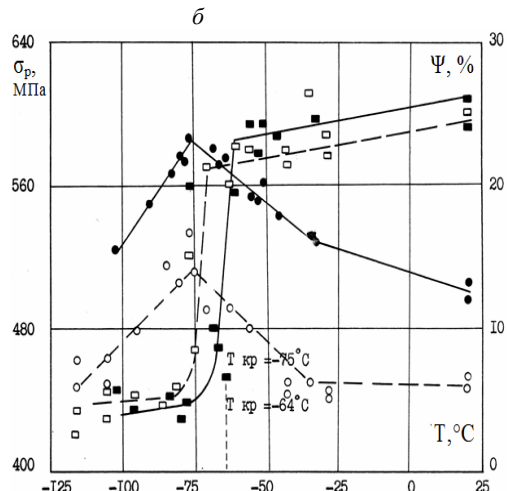
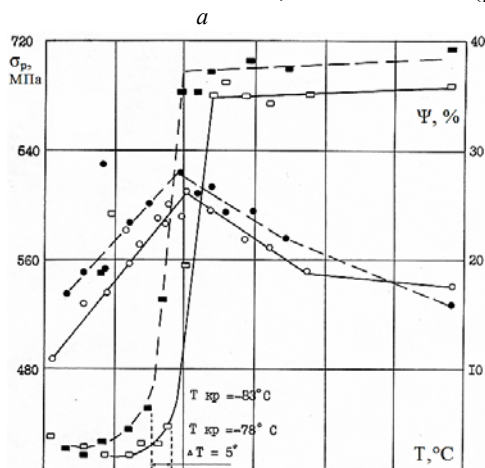


Рис. 2. Температурные зависимости силовых и деформационных характеристик разрушения образцов фундаментных болтов: А – М30 из стали 09Г2С серий БФ-7 (● – разрушающие напряжения при осевом растяжении, ■ – относительное сужение при осевом растяжении) и БФ-8 (○ – разрушающие напряжения при растяжении с изгибом, □ – относительное сужение при растяжении с изгибом); Б – из стали ВСтЗпс серий БФ-9 (○ – разрушающие напряжения болтов М36, □ – относительное сужение болтов М36) и БФ-10 (● – разрушающие напряжения болтов М48, ■ – относительное сужение болтов М48)

Согласно требованиям действующих норм для фундаментных болтов, эксплуатируемых в районах с расчетной температурой до -50°C и до -65°C , рекомендуется применять низколегированные стали соответственно 09Г2С-6 и 09Г2С-8. Эти стали отличаются между собой только тем, что сталь 8-й категории ударной вязкости подвергается нормализации. Как известно, после нормализации структура стали получается более упорядоченной, снимаются внутренние напряжения, что приводит к улучшению пластических свойств проката и к повышению его ударной вязкости [13,14].

Для того, чтобы количественно оценить степень влияния нормализации на сопротивляемость фундаментных болтов хрупкому разрушению были испытаны образцы из малоуглеродистой стали ВСтЗпс (серии БФ-11, БФ-12) и из низколегированной 09Г2С (серии БФ-13, БФ-14). Образцы серий БФ-11 и БФ-13 были изготовлены из стали в исходном (горячекатаном) состоянии, а образцы серий ОС-12 и ОС-14 после изготовления были подвергнуты нормализации.

В табл. 1 приведены пороги хладноломкости, которые определялись путем испытания стандартных образцов с надрезом на ударный изгиб и критические температуры хрупкости, которые были получены при испытании натуральных образцов болтов на растяжение с изгибом.

Таблица 1

Параметры испытания натуральных образцов болтов на растяжение с изгибом							
Серия	Болт, марка стали	Вид нагружения	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$	$T_{кcv}, ^\circ\text{C}$	$T = T_{кcv} - T_{кр}$	Сталь	Серия, шт
БФ-5	М30 ВСт3пс	Осевое растяжение	-77	-33	44	г.к	35
БФ-6	М30 ВСт3пс	Растяжение с изгибом	-67	-33	34	г.к	20
БФ-7	М30 09Г2С	Осевое растяжение	-83	-58	25	г.к	15
БФ-8	М30 09Г2С	Растяжение с изгибом	-78	-58	19	г.к	15
БФ-9	М36 МСт3пс	Растяжение с изгибом	-75	-36	39	г.к	20
БФ-10	М48 МСт3пс	Растяжение с изгибом	-64	-38	26	г.к	20
БФ-11	М36 МСт3пс	Растяжение с изгибом	-80	-60	20	г.к	15
БФ-12	М36 МСт3пс	Растяжение с изгибом	-119	-60	59	н	15
БФ-13	М48 МСт3пс	Растяжение с изгибом	-56	-20	36	г.к	15
БФ-14	М48 МСт3пс	Растяжение с изгибом	-85	-45	40	н	10

Из табл. 1 видно, что сталь марки 09Г2С в горячекатаном состоянии имеет порог хладноломкости -20°C , а в нормализованном -45°C . Характерно, что сталь марки ВСт3пс в горячекатаном и в нормализованном состоянии имеет один и тот же порог хладноломкости равный -60°C .

Результаты испытаний показали также, что нормализация в целом благоприятно сказывается на хладостойкости самих болтов. Так, для горячекатаных болтов М48 из стали 09Г2С (серия БФ-13) критическая температура хладостойкости составила -56°C , а для этих же болтов после нормализации (серия БФ-14) критическая температура составила -85°C (рис. 3А).

Для фундаментных болтов из стали ВСт3пс в горячекатаном состоянии (серия БФ-11) критическая температура хладноломкости составила -80°C , а для этих болтов в нормализованном состоянии (серия БФ-12) достичь температуры перехода болтов в хрупкое состояние не удалось, несмотря на снижение температуры испытаний до -119°C (рис. 3Б).

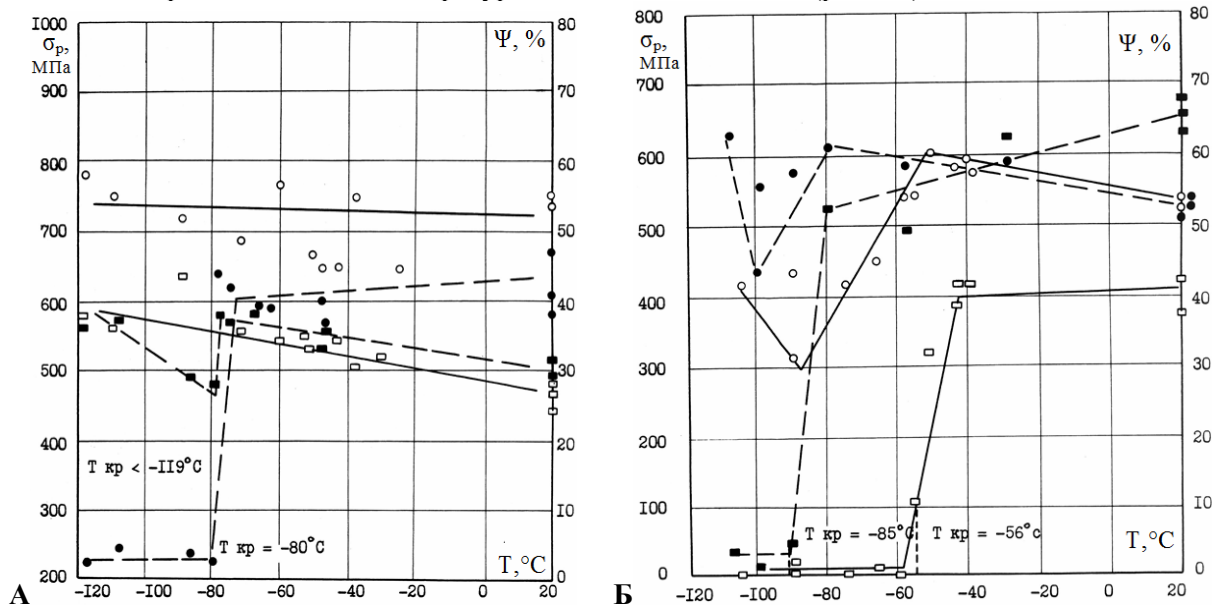


Рис. 3. Температурные зависимости силовых и деформационных характеристик разрушения образцов фундаментных болтов: А – М36 из стали ВСт3пс серий БФ-11 (● – разрушающие напряжения образцов из горячекатаной стали, ■ – остаточное сужение образцов из горячекатаной стали) и БФ-12 (○ – разрушающие напряжения образцов из нормализованной стали, □ – относительное сужение образцов из нормализованной стали); Б – М48 из стали 09Г2С серий БФ-13 (○ – разрушающие напряжения образцов из горячекатаной стали, □ – относительное сужение образцов из горячекатаной стали) и БФ-14 (● – разрушающие напряжения образцов из нормализованной стали, ■ – относительное сужение образцов из нормализованной стали)

Таким образом, видно, что, в соответствии с общепринятыми представлениями, нормализация значительно повышает хладостойкость фундаментных болтов, сдвигая критическую температуру приблизительно на $30-40^\circ$ в сторону более низких температур.

Как показал анализ норм проектирования, все без исключения конкретные рекомендации по предотвращению хрупкого разрушения обоснованы экспериментальными исследованиями. Однако, низкотемпературные испытания крупноразмерных образцов являются дорогостоящими и трудоемкими. Наиболее простым способом оценки хладостойкости стали является испытание стандартных образцов с надрезом на маятниковом копре. Поэтому в настоящее время исходной характеристикой при выборе стали для проектирования хладостойких конструкций, является ударная вязкость. Необходимо отметить, что на основании многочисленных испытаний на ударную вязкость получен большой банк данных по всем маркам конструкционной стали [15-18].

На основании изложенного, по результатам низкотемпературных испытаний (табл. 1), была установлена зависимость, которая позволяет определить действительную величину критической температуры хрупкости $T_{кр}$ для болтов по порогу хладноломкости $T_{кcv}$, что дает возможность использовать в расчетах на хрупкую прочность банк данных по ударной вязкости.

Степень тесноты, а также характер зависимости между величиной порога хладноломкости $T_{кcv}$ и величиной критической температуры хрупкости для фундаментных болтов характеризуются коэффициентом корреляции, равным 0,883, что говорит о существовании между исследуемыми характеристиками почти строгой линейной зависимости. Эмпирическая регрессионная зависимость находилась путем подстановки в уравнение параметров, полученных в результате корреляционного анализа: $T_{кр}=0,552T_{кcv}-48,5^{\circ}\text{C}$. При поставке проката из стали 09Г2С-6 требуемая ударная вязкость $T_{кcv}=29 \text{ Дж/см}^2$ гарантируется при температуре -40°C , т.е. критическая температура хрупкости для такой стали $T_{кр}$ гарантируется всегда при температуре ниже -40°C . Для болтов из стали 09Г2С-6 $T_{кр}=0,662\times(-40^{\circ}\text{C})-48,5^{\circ}\text{C}=-70^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности применения горячекатаных болтов диаметром до 48 мм из стали 09Г2С-6 для крепления конструкций в климатических районах с расчетной температурой до -65°C . Пользуясь приведенной формулой, для фундаментных болтов из стали марки ВСтЗпс, имеющей гарантию ударной вязкости при температуре -20°C , получаем $T_{кр}=0,552\times(-20^{\circ}\text{C})-48,5^{\circ}\text{C}=-59^{\circ}\text{C}$.

Такой результат позволяет сделать вывод о возможности применения фундаментных болтов из стали ВСтЗпс, имеющей гарантию ударной вязкости при температуре -20°C , в климатических районах с расчетной температурой до -50°C .

Расчет на хрупкую прочность включает в себя не только определение допустимой температуры эксплуатации, но и проверку прочности. Для осуществления этой проверки были сопоставлены показатели прочности фундаментных болтов при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ и при допустимой эксплуатационной температуре. На основании анализа низкотемпературных диаграмм (рис. 1-3), полученных в результате исследований, было установлено, что разрушающие напряжения для фундаментных болтов, соответствующие температуре вязко-хрупкого перехода, во всех случаях - на 10-20% выше, чем при температуре $+20^{\circ}\text{C}$. Этот результат был предопределен ограничением нижней границы эксплуатационной пригодности фундаментных болтов температурой вязко-хрупкого перехода.

Список литературы

1. Биргер И.А., Иоселевич Г.Б. Резьбовые соединения. -М.: Машиностроение, 1973. -255с.
2. ГОСТ 24379.0-80. Болты фундаментные. Общие технические условия. -М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1981. -6с.
3. СНиП II-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования. -М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. -96с.
4. Беляев С.В. Исследование прочности болтов при растяжении с перекосом//Заводская лаборатория. 1945. - №11 -С. 604-623.
5. Кочергова Е.К. Работа на срез черных болтов из сталей марок Ст3, Ст5 и 35ГС//Промышленное строительство. -1963. -№3. -С. 46-48.
6. Мацелинский Е.Р. О назначении расчетных сопротивлений болтов классов прочности 4.8 и 5.8//Труды института ЦНИИСК. 1977. Теоретические исследования строительных конструкций. -С. 148-154.
7. Банков Б.А. Исследование прочности резьбовых соединений при низких температурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. -М.: МВТУ им. Баумана, 1999. -19 с.
8. Ярошевич В.Д. Об оценке склонности металлов к хладноломкости //Заводская лаборатория, 1994. - № 9. - С.1119-1121.
9. Пименов И.Л. Исследование работы сопряжения базы стальной колонны и бетонного фундамента: Дис. ... канд. техн. наук. -М.: МИСИ им. Куйбышева, 1963. -153 с.
10. Birkeмоc P., Gilmor M. Behavior of Bearing Critical Double-Angle Connections.//Steel Construction. 1978. - №4.

11. Гудков А.А., Славский Ю.И. Методы измерения твердости металлов и сплавов. -М.: Металлургия, 1982. - 165 с.
12. Chong K., Matlock R. Light-Gage Steel Bolted Connections without washers//Journal of the Structural Division. 1975. - № 7.
13. Белов А.В. Исследование и расчет влияния перекосов на работоспособность резьбовых соединений общего назначения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М.: МВТУ им. Баумана, 1983. -16 с.
14. Pirkins A., Hogan J. Bolted connections of the Steel Construction. - 1977. -№ 3.
15. Mors H. Erfahrungsergebnisse auf Prüfstationen für freileitungsstahlgastische Verbindungen//Stahlbau.-1980.- № 6.-S. 161-165.
16. WG 22-08. Single bolt connections of angles in transmission line tower. Recommendation for calculation of the strength of longitudinal and transverse edge distances. August 1984. J.van.Bodegom, B.Evensen, J.J.Gidlung.
17. Pisher J. Struik J. Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints. - John Wiley, 1974.
18. Gilchrist R., Chong K. Thin Light-Gage Bolted Connections without washers//Journal of the Structural Division. -1999. - № 1.

Рукопись поступила в редакцию 16.03.15

УДК 622.7: 658.562

М.А. ТИМОШЕНКО, магістрант, Криворізький національний університет

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ РУДИ В УМОВАХ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ

Розглянуто актуальні питання ефективності процесу збагачення залізної руди. Обґрунтовано питання важливості класифікації руди на мінералого-технологічні різновиди. Аргументована важливість усереднення характеристик руди з метою мінімізації втрат корисного компоненту та збільшення ступеню його розкриття. Розглянуто методи контролю якості руди на різних етапах збагачення. У тому числі приділено увагу фізичному стану заліза на конкретних стадіях подрібнення та збагачення та відповідній специфіці фізичних показників, враховуваних у різних методах. Розглянуто фізичну природу показників розподілення залізної руди на технологічні різновиди та обґрунтовано негативний вплив недоподрібненої та переподрібної руди на знос гірничозбагачувального обладнання та втрати корисного компоненту. На основі розглянутої інформації сформульовано їх переваги та недоліки. Виявлено, що методи контролю руди недостатньо розвинуті та знаходяться на стадії дослідження. Отже, вказано напрямок подальших досліджень – розвиток методів контролю розкриття корисного компоненту у твердій фазі пульпи.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На даний момент гірничорудна промисловість України переживає тяжкі часи. Залізні басейни поступово виснажуються, що вкрай негативно впливає на вміст корисного компонента у вихідному продукті. Також, за рахунок застарілого обладнання та методів керування, виробництво стає дуже енергозатратним, тобто економічно не вигідним з точки зору співвідношення «затрати енергії – кількість і якість продукту». Саме тому необхідно вдосконалювати та оптимізувати процеси обробки та збагачення залізної руди. Значну роль відіграє різноманіття руди. Мінералого-технологічних різновидів руди велика кількість. Вони можуть досить сильно відрізнятися за вмістом мінералів, а значить за фізичними і хімічними властивостями, навіть у рамках одного гірничо-збагачувального комбінату, не кажучи вже про різні фабрики, які мають різні родовища. Тільки на ПАТ «Інгулецький ГЗК» розрізняють 7 різновидів оброблюваної руди.

Кожен різновид потребує відповідного оптимального режиму роботи гірничозбагачувального обладнання на кожній стадії збагачення. Відповідно до міцності вихідного матеріалу повинен відповідно бути налаштований млин (кількість мелючих шарів або швидкість обертання барабану, наприклад), класифікатор, сепаратор та інше обладнання. Переподрібнена і недоподрібнена руда призводять до великих втрат корисного компоненту у хвостах.

Проте у реальних умовах неможливо, щоб на обробку потрапив якийсь один чітко визначений різновид руди. Це завжди суміш із декількох різновидів. Налаштовуючи обладнання на оптимальну роботу з одним з них -отримаємо великі втрати по іншим різновидам. Саме тому необхідно проводити усереднення показників вихідної руди і відповідно пристосовувати згідно цих показників режими роботи гірничозбагачувального устаткування.

Аналіз досліджень та публікацій. Контроль якості руди у цілому здійснюється у двох напрямках - контроль характеристик руди у потоці та контроль її характеристик у пульпі.

Найчастіше застосовувані методи контролю параметрів руди у потоці - рентгенодіаметричний, нейтронно-активаційний та гамма-гамма метод [1,7].