

УДК 66.7

д.т.н. Сотников А. Л.,  
Щербина С. В.  
(ДонГТУ, г. Донецк, ДНР)

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ЕГО СБОРКЕ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Приведены результаты определения вероятности безотказной работы резьбового соединения крепления основания поворотного стенда машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) при его сборке различными методами. Показано, что применение метода затяжки болтов приложением осевых сил позволяет повысить не только вероятность безотказной работы, но и проектный ресурс резьбовых соединений такой высоконагруженной машины, как поворотный стенд МНЛЗ.

**Ключевые слова:** резьбовое соединение, болт, методы сборки, квантиль, вероятность безотказной работы, проектный ресурс.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Важными условиями, которые влияют на обеспечение безотказной работы резьбовых соединений высоконагруженных, в частности металлургических, машин, являются правильность расчёта силы предварительной затяжки с учётом функциональных особенностей металлургических машин и обеспечение высокой точности создания значения этой силы в процессе сборки [1–5].

Установив зависимость между точностью затяжки болтов (шпилек) и вероятностью их безотказной работы, можно будет оценить проектный ресурс резьбовых соединений металлургических машин [6–10]. В частности, такие задачи характерны для оборудования машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [11–15].

**Постановка задачи.** Задачей настоящей работы является изучение влияния точности создания силы предварительной затяжки (или точности затяжки) в шпильках крепления основания поворотного стенда МНЛЗ на вероятность их безотказной работы и проектный ресурс резьбовых соединений.

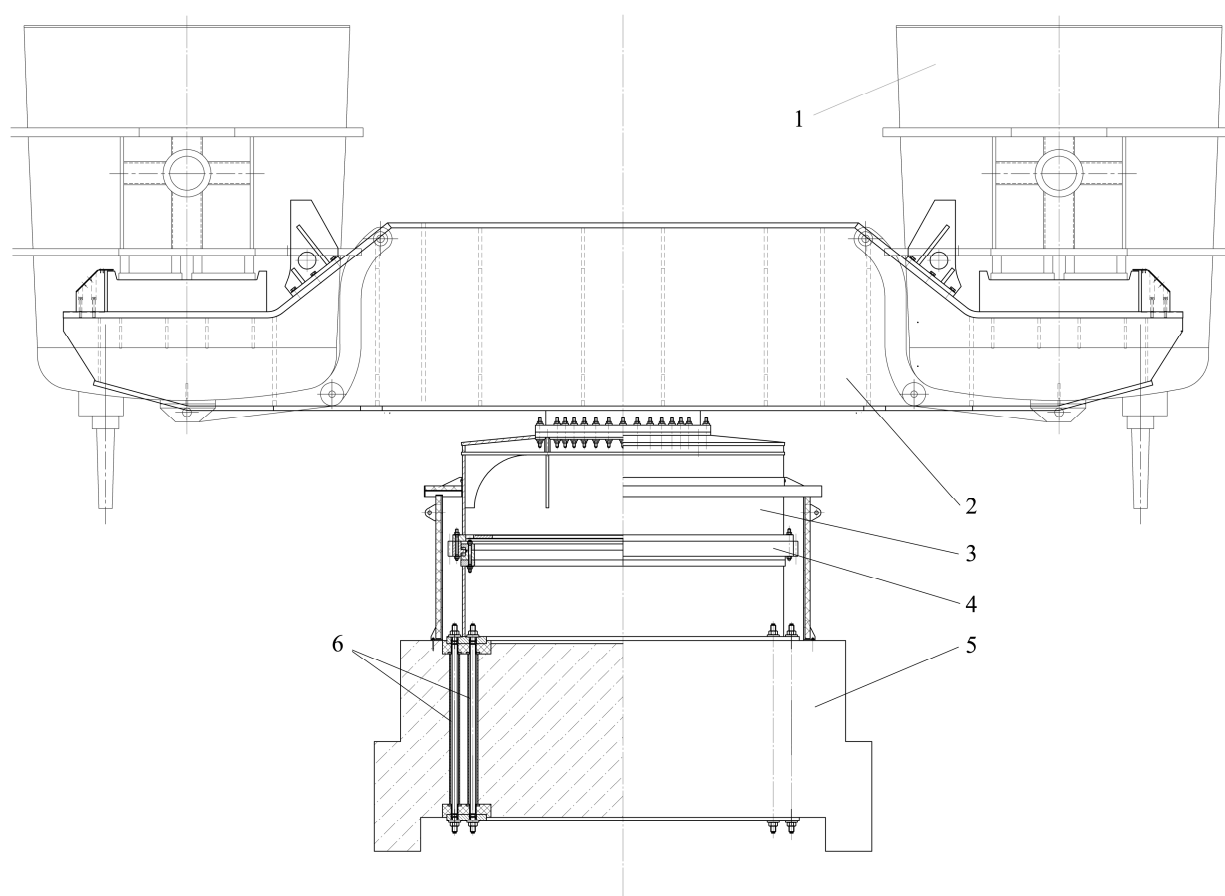
**Изложение материала и результаты.** Решение задачи показано на примере резьбового соединения крепления основания поворотного стенда МНЛЗ электросталеплавильного цеха одного из металлургических заво-

дов Донецкого региона. Неподвижная колонна поворотного стенда установлена на фундаменте и закреплена на нём 24-мя шпильками М36 по периметру основания (рис. 1).

К поворотной колонне 3 стенда крепится платформа 2, на которой свободно устанавливаются сталеразливочные ковши 1 (см. рис. 1). Наиболее неблагоприятное условие нагружения стенда, вызывающее возникновение момента опрокидывания, возникает при установке на поворотный стенд только одного ковша, заполненного расплавом. В этом случае при повороте стенда шпильки 6 воспринимают циклически изменяющиеся переменные нагрузки в результате действия опрокидывающего момента. Выполненный проверочный расчёт шпилек при массе металла с ковшом 125 т показал правильность назначения их диаметра.

В соответствии с известными положениями теории расчёта надёжности машин [7], вероятность безотказной работы резьбового соединения  $p$  равна произведению вероятностей безотказной работы по различным критериям ( $p_1$  — нераскрытия стыка;  $p_2$  — сопротивления усталости болта (шпильки);  $p_3$  — статической прочности болта (шпильки) и др.):

$$p = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \dots \quad (1)$$



1 — сталеразливочный ковш; 2 — платформа; 3 — поворотная колонна;  
4 — опорно-поворотное устройство; 5 — фундамент; 6 — шпильки

Рисунок 1 Общий вид поворотного сталеразливочного стенда МНЛЗ

Число учитываемых критериев определяется в зависимости от их значимости.

Остановимся на вероятности безотказной работы резьбового соединения по критерию нераскрытия стыка, которая соответствует вероятности того, что наименьшие напряжения сжатия в стыке после приложения внешней нагрузки будут больше нуля. Вероятность безотказной работы резьбового соединения в этом случае зависит от квантиля нормированного нормального распределения  $u_{p_1}$  (далее — квантиль) [7]:

$$u_{p_1} = -\frac{\bar{n}_1 - 1}{\sqrt{\bar{n}_1^2 \cdot v_{Q_0}^2 + v_P^2}}, \quad (2)$$

где  $v_{Q_0}, v_P$  — коэффициенты вариации силы предварительной затяжки  $Q_0$  и техно-

логической силы  $P$ , по данным работы [7] принимаем  $v_P = 0,1$ ; значение  $v_{Q_0}$  зависит от разброса силы затяжки  $\delta$  (табл. 1);  $\bar{n}_1$  — коэффициент запаса нераскрытия стыка по средним нагрузкам определяется по формуле

$$\bar{n}_1 = \frac{\bar{Q}_0}{\beta_c \cdot \bar{P} \cdot (1 - \chi)}, \quad (3)$$

где  $\bar{Q}_0$  и  $\bar{P}$  — средние значения сил  $Q_0$  и  $P$  соответственно;  $\beta_c$  — коэффициент, учитывающий возможное ослабление затяжки вследствие обжатия стыков в процессе работы соединения —  $\beta_c = 1,1$  [7];  $\chi$  — коэффициент основной нагрузки соединения.

В таблице 1 приведены значения: коэффициента вариации силы предварительной

затяжки по данным работы [7], квантиля, рассчитанные по формуле (2), и вероятности безотказной работы резьбового соединения по критерию нераскрытия стыка  $p_1$ . Расчёты квантиля  $u_{p_1}$  выполнены для значения  $\chi=0,3$  и отношения  $\bar{Q}_0 / \bar{P} = 1$ .

Разброс силы затяжки в таблице 1 характеризует точность затяжки резьбового соединения. Наименьший разброс значения силы затяжки соответствует более высокой точности затяжки, а, соответственно, наибольший разброс значения — менее высокой точности.

На рисунке 2 приведена графическая зависимость значений вероятности безотказной работы рассматриваемых резьбовых соединений по критерию нераскрытия стыка от точности создания силы предварительной затяжки в шпильках. Эта зависимость также наглядно показывает, что чем больше разброс силы предварительной затяжки, тем ниже вероятность безотказной работы резьбового соединения (показаны стрелки на рисунке 2).

Ниже приведён расчёт значения квантиля  $u_{p_1}$  по формуле (2) при сборке резьбовых соединений методом приложения осевых сил и разном количестве затяжек:

– 1 затяжка (разброс силы затяжки  $\pm 3...5$  %):

$$u_{p_1} = -\frac{1,3 - 1}{\sqrt{1,3^2 \cdot 0,02^2 + 0,1^2}} = -2,903;$$

– 2–3 последовательные затяжки в соответствии с рекомендациями, данными в работах [8, 9] (разброс силы затяжки  $\pm 2,5$  %):

$$u_{p_1} = -\frac{1,43 - 1}{\sqrt{1,43^2 \cdot 0,017^2 + 0,1^2}} = -4,178.$$

Применение рекомендаций по последовательной затяжке болтов 2–3 раза методом приложения осевых сил приводит к полному выбору зазоров в резьбе болта (шпильки) и между гайкой и деталью стыка [8, 9]. При этом коэффициент  $\beta_c=1$ , а это, в свою очередь, приведёт к повышению коэффициента запаса нераскрытия стыка по средним нагрузкам на 10 % и, соответственно, квантиля  $u_{p_1}$ .

В таблице 2 приведены значения вероятности безотказной работы исследуемого резьбового соединения по критерию нераскрытия стыка  $p_1$ .

Применение рекомендаций по сборке рассматриваемых резьбовых соединений методом приложения осевых сил позволяет не только устранить касательные напряжения в теле шпильки, но и повысить вероятность их безотказной работы по критерию нераскрытия стыка до 0,99998.

Таблица 1

Данные и результаты определения вероятности безотказной работы резьбового соединения по критерию нераскрытия стыка

Разброс силы затяжки, $\delta$ , %	Коэффициент вариации силы $Q_0$ , $v_{Q_0}$	Квантиль $u_{p_1}$	Вероятность безотказной работы $p_1$
$\pm 25...30$	0,09	-1,949	0,97440
$\pm 15$	0,05	-2,515	0,99405
$\pm 10$	0,04	-2,661	0,99610
$\pm 3...5$	0,02	-2,903	0,99816

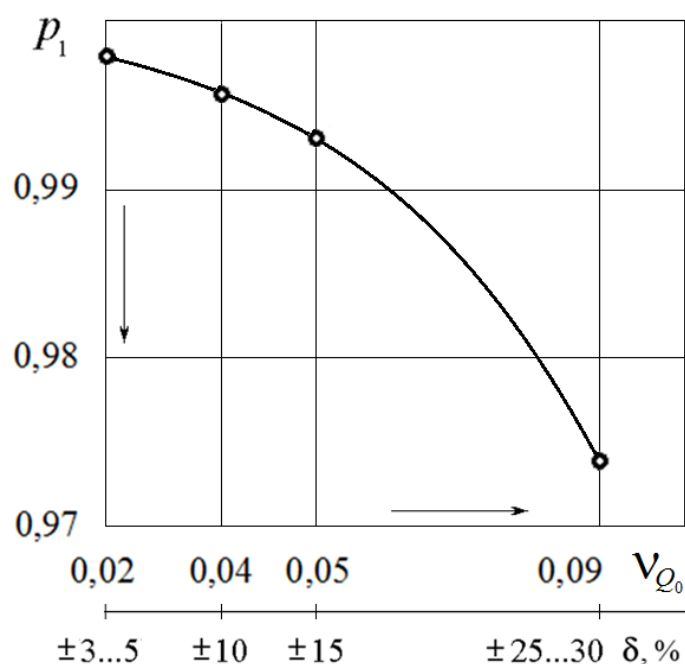


Рисунок 2 Зависимость вероятности безотказной работы резьбового соединения по критерию нераскрытия стыка от разброса значений  $\delta$  силы предварительной затяжки

Ресурс рассматриваемых резьбовых соединений крепления основания поворотного станда МНЛЗ определяется в сутках и зависит от трёх параметров:  $k_1=10$  лет — количества лет их работы;  $k_2=365$  дней — количества рабочих дней в году; вероятности их безотказной работы по критерию нераскрытия стыка  $p_1$ :

$$PC = k_1 \cdot k_2 \cdot p_1. \quad (4)$$

Ресурс рассматриваемых резьбовых соединений крепления основания поворотного станда МНЛЗ при вероятности их безотказной работы по критерию нераскрытия сты-

ка 0,9744 (затяжка шпилек методом приложения внешнего крутящего момента) равен

$$PC1 = 10 \cdot 365 \cdot 0,9744 = 3556,56 \text{ сут.}$$

Ресурс рассматриваемых резьбовых соединений при вероятности их безотказной работы по критерию нераскрытия стыка 0,99816 (затяжка шпилек методом приложения осевых сил 1 раз) равен

$$PC2 = 10 \cdot 365 \cdot 0,99816 = 3643,28 \text{ сут.}$$

Тот же ресурс при затяжке шпилек методом приложения осевых сил 2–3 раза в соответствии с рекомендациями работ [8, 9] равен

$$PC3 = 10 \cdot 365 \cdot 0,99998 = 3649,92 \text{ сут.}$$

Таблица 2

Результаты определения вероятности безотказной работы рассматриваемого резьбового соединения по критерию нераскрытия стыка

Разброс силы затяжки $\delta, \%$	Количество затяжек	Квантиль $u_{p_1}$	Вероятность безотказной работы $p_1$
$\pm 3 \dots 5$	1	-2,903	0,99816
$\pm 2,5$	2–3	-4,178	0,99998

Повышение проектного ресурса поворотного станда МНЛЗ в результате перехода с метода затяжки шпилек приложением внешнего крутящего момента на метод приложения осевых сил (1 затяжка) составит

$$\begin{aligned} \text{ПР1} &= \text{РС2} - \text{РС1} = \\ &= 3643,28 - 3556,56 = 86,72 \text{ сут,} \end{aligned}$$

а в результате затяжки шпилек с использованием рекомендаций работ [8, 9] (2–3 затяжки методом приложения осевых сил) составит

$$\begin{aligned} \text{ПР2} &= \text{РС3} - \text{РС1} = \\ &= 3649,92 - 3556,56 = 93,36 \text{ сут.} \end{aligned}$$

Применение для сборки крупногабаритных резьбовых соединений рекомендаций по затяжке шпилек методом приложения осевых сил 2–3 раза позволяет повысить вероятность их безотказной работы по критерию нераскрытия стыка до 0,99998 и, соответственно, не допустить сокращения проектного ресурса поворотного станда МНЛЗ, равного 10 годам.

### Библиографический список

1. Жиркин, Ю. В. *Надёжность, эксплуатация и ремонт металлургических машин [Текст] : учебник. Часть 2 / Ю. В. Жиркин. — Магнитогорск : МГТУ, 2005. — 118 с.*
2. Сотников, А. Л. *Расчёт усилия предварительной затяжки резьбового крепления полового вала редуктора [Текст] / А. Л. Сотников, Н. А. Родионов, А. А. Ольшевский, С. В. Птуха // Металлургические процессы и оборудование. — 2013. — № 2. — С. 50–57.*
3. Сотников, А. Л. *Сборка крупногабаритных резьбовых соединений методом приложения осевых сил [Текст] / А. Л. Сотников, С. В. Щербина // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 48. — С. 167–174.*
4. Сотников, А. Л. *Унификация требований к крупногабаритным резьбовым соединениям металлургического оборудования [Текст] / А. Л. Сотников, С. В. Щербина // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии – 2017 : Материалы III Межд. науч. конф. (Череповец, 19–20 октября 2017 г.). — Череповец : Череповецкий гос. ун-т, 2017. — С. 225–231.*
5. Шоломицкий, А. А. *Наблюдения за деформациями, оценка и прогнозирование технического состояния подъёмно-транспортного оборудования [Текст] / А. А. Шоломицкий, А. Л. Сотников, В. М. Нагорный, В. В. Нагорный, Т. Г. Николаева, Н. В. Малеев // Металлургические процессы и оборудование. — 2009. — № 3. — С. 31–38.*
6. *Эксплуатация и обслуживание машин [Текст] : учебник для вузов / В. М. Кравченко, А. А. Иценко, В. А. Сидоров, В. В. Буцукин. — Донецк : Донбасс, 2014. — 532 с.*
7. Решетов, Д. Н. *Надёжность машин [Текст] / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. — М. : Высшая школа, 1988. — 238 с.*
8. Щербина, С. В. *Применение гидравлического устройства для сборки резьбовых соединений большого диаметра [Текст] / С. В. Щербина // Прогрессивные технологии и системы*

машиностроения : Международный сб. научных трудов. — Донецк : ДонГТУ. — 1999. — Вып. 7. — С. 211–214.

9. Седуш, В. Я. Сборка крупногабаритных резьбовых соединений методом приложения осевых сил [Текст] / В. Я. Седуш, С. В. Щербина // Защита металлургических машин от поломок. — 2002. — Вып. 6. — С. 116–122.

10. Сотников, А. Л. Моделирование динамики механических систем [Текст] / А. Л. Сотников, Р. В. Ковалев // Вибрация машин : измерение, снижение, защита. — 2012. — № 3. — С. 44–49.

11. Сотников, А. Л. Состояние непрерывной разливки стали на сортовых МНЛЗ в Украине и Молдове [Текст] / А. Л. Сотников, В. Н. Киреев, А. Ю. Оробцев и др. // Сталь. — 2013. — № 12. — С. 8–13.

12. Смирнов, Е. Н. Проблемы совершенствования оборудования машин непрерывного литья заготовок [Текст] / Е. Н. Смирнов, А. Л. Сотников, Н. А. Родионов, А. Стефаник // Metallurgy 2012, New Technologies and Achievements. — Czestochowa (Poland) : Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej, 2012. — Seria : Monografie. — No. 25. — P. 69–76.

13. Сотников А. Л. Принципы обеспечения точности конструктивных параметров сортовой МНЛЗ [Текст] / А. Л. Сотников // Современные проблемы электрометаллургии стали : материалы XVII Межд. конф. : в 2 ч. — Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2017. — Ч. 2. — С. 57–66.

14. Могильный, С. Г. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. А. Лунев, А. Л. Сотников, Э. М. Ватралик, И. С. Фролов // Металлургические процессы и оборудование. — 2012. — № 3. — С. 12–25.

15. Сотников, А. Л. Задачи и методы контроля и диагностирования технологического оборудования МНЛЗ [Текст] / А. Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. — 2014. — № 3. — С. 33–44.

© Сотников А. Л.

© Щербина С. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Сидоровым В. А., к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.

Статья поступила в редакцию 12.10.18.

д.т.н. Сотников О. Л., Щербина С. В. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

#### ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ РІЗЬБОВОГО З'ЄДНАННЯ ПРИ ЙОГО ЗБИРАННІ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ

Наведено результати визначення ймовірності безвідмовної роботи різьбового з'єднання кріплення основи поворотного стенда машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) при його збиранні різними методами. Показано, що застосування методу затягування болтів прикладанням осевих сил дозволяє підвищити не тільки ймовірність безвідмовної роботи, але й проектний ресурс різьбових з'єднань такої високонавантаженої машини, як поворотний стенд МБЛЗ.

**Ключові слова:** різьбове з'єднання, болт, метод збирання, квантиль, ймовірність безвідмовної роботи, проектний ресурс.

Doctor of Tech. Sc. Sotnikov A. L., Shcherbina S. V. (DonNTU, Donetsk, DPR)

#### ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF NO-FAILURE THREADED CONNECTIONS AT IT ASSEMBLY BY DIFFERENT METHODS

There have been given the results of determining the probability of no-failure operation of the threaded connection fixing the base of the rotary stand of the continuous casting machine (CCM) during its assembly by different methods. It is shown that the use of the method of bolts tightening by the application of axial forces allows to increase not only the probability of no-failure operation, but also the design service life of threaded connections of such a high-loaded machine as the CCM rotary stand.

**Key words:** threaded connection, bolt, assembly methods, quantile, probability of no-failure operation, design service life.