

НОВЫЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ СТЕНДОВ

УДК 519.718.2

Кузьминов Александр Леонидович

*Директор Инженерно-технического института, заведующий кафедрой
подъемно-транспортных машин ГОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»,
доктор технических наук, профессор*

Кожневиков Александр Вячеславович

*Доцент кафедры подъемно-транспортных машин, заместитель директора
Инженерно-технического института ГОУ ВПО «Череповецкий
государственный университет»,
кандидат технических наук*

В процессе эксплуатации с течением времени в металлоконструкциях (МК) машин и оборудования металлургического производства происходят процессы, приводящие к снижению (потере) их работоспособности и безопасности эксплуатации. Наличие непрерывного технологического процесса при высоких температурах и силовых воздействиях, характерных для машин и оборудования металлургического производства, ускоряет эти нежелательные процессы в МК.

Основными типами повреждений являются остаточные деформации, усталостные трещины и местные деформирования элементов МК. Наиболее поврежденными являются зоны изменения сечений МК, сварные соединения, узлы крепления механизмов, концентраторы напряжений и т.д.

Характерными причинами произошедших крупных аварий являются:

- длительная эксплуатация МК при наличии усталостных трещин;
- конструкционные недостатки (высокая концентрация сварных швов, наличие концентраторов напряжений в зоне повышенной нагруженности и т.д.);
- некачественный металл и дефекты сварки;
- повышенные эксплуатационные напряжения, приводящие к превышению предела выносливости или предела текучести стали;
- воздействие высоких температур (температурные деформации, прогары и т.д.).

Своевременная оценка остаточной несущей способности и надежности МК машин и оборудования металлургического производства имеет существенное значение для обеспечения безопасной эксплуатации и ремонта в оптимальные сроки для увеличения их ресурса, а также для осуществления нормального технологического процесса.

Ключевым узлом оборудования, обеспечивающим подачу стали в сталеплавильных производствах металлургических заводов, является стелеразливочных ковшей.

Сталеразливочный стенд предназначен для приема сталеразливочного ковша с жидким металлом с разливочного крана в исходном положении; передачи ковша поворотом траверсы на 180° в позицию разливки; подъема и опускания ковша для выполнения технологических операций разливки; возвращения порожнего ковша в исходную позицию. Стенд состоит из двух основных частей, подковообразных балок, предназначенных для установки сталеразливочных ковшей и траверсы, состоящей из двух балок коробчатого сечения. Траверса устанавливается на опору с помощью осей на подшипниках качения и совместно с двулучными рычагами образует *T*-образное коромысло, качательные движения которого обеспечивают подъем и опускание сталеразливочного ковша. Опора устанавливается на поворотной платформе и крепится к ней болтами. Поворотная платформа в свою очередь служит основанием поворотной части стенда. Она выполнена сварно-литой и состоит из трех частей, соединенных аналогично балкам траверсы.

Большие нагрузки (масса разливочных ковшей с расплавом 500т), непрерывный технологический процесс, температурные воздействия, ограниченность доступа к элементам и т.д. ускоряют процессы, приводящие к снижению его работоспособности и безопасности эксплуатации, а также затрудняют получение полной информации по результатам испытаний. Надежность и безопасная эксплуатация сталеразливочного стенда в первую очередь зависит от состояния его металлоконструкций, особенно после выработки нормативного срока эксплуатации.

Проблема оценки состояния несущих металлоконструкций сталеразливочных стендов актуальна не только из-за большого числа объектов, отработавших нормативный срок, но и из-за нехватки методик неразрушающего контроля для получения достоверной информации о несущей способности МК, для достоверного определения остаточного срока эксплуатации, а также отсутствием удобных для использования методик оценки надежности МК.

Предлагается новый метод испытания, который относится к интегральному неразрушающему методу, и который можно применять при испытании балок траверс сталеразливочных стендов. Рассмотрено два варианта определения несущей способности МК сталеразливочных стендов: при линейной зависимости между напряжениями и нагрузкой, а также между напряжениями и деформациями материала, т.е. $\sigma = \varepsilon \cdot E$, $F = k \cdot \sigma$ и при нелинейной зависимости между F и σ [1].

Рассмотрим методику определения несущей способности МК сталеразливочного стенда при линейной зависимости F от σ .

Предварительно выбирается значение испытательной нагрузки, которое может быть равно нагрузке, при которой работает сталеразливочный стенд или в 2-3 раза меньше этой нагрузки.

Суть метода в следующем. В конструкции выявляются места (элементы) с наибольшими напряжениями или усилиями от прилагаемой нагрузки, где и устанавливают измерители деформаций (перемещений). Если этого сделать не удастся, то в дальнейшем необходимо произвести перерасчет по опасному сечению. Установка тензометров на балке траверсы сталеразливочного стенда (сечения 1-1 и 2-2) показана на рис. 1.

Расстановка приборов-измерителей деформаций в сечении элемента зависит от вида деформации (удлинение, укорочение, искривление, закручивание), формы и размеров поперечного сечения стержня и возможного наложения одного вида деформации на другой вид.

В двутавровых балках при равномерно распределенной или сосредоточенной нагрузке, а также в балках коробчатого сечения таким местом является верхняя или нижняя кромка (грань) балки в зависимости от формы ее поперечного сечения, как показано на рис. 2.

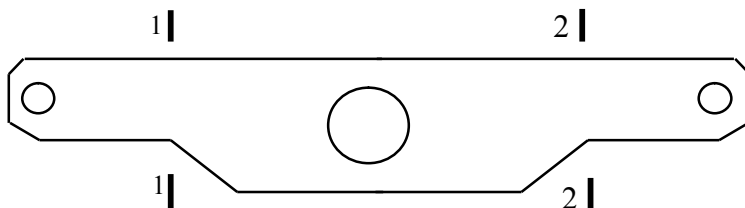


Рис. 1. Сечения установки измерителей деформаций

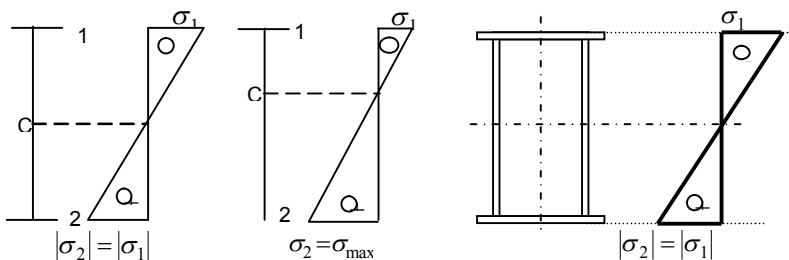


Рис. 2. Распределение напряжений в балках различных форм сечений (с – центр тяжести сечения, индекс у σ показывает место (адрес)). Во всех случаях в одном сечении рекомендуется устанавливать несколько измерителей деформаций для выявления наибольшего напряжения в этом сечении

Если в ходе обследований конструкции обнаружено наличие трещин в растянутой зоне или в ходе испытаний получены подозрительно малые значения деформаций, то необходимо произвести установку измерителей деформаций и в сжатой зоне металлоконструкции.

В зависимости от количества нагружений (допустим 15 – 20 и более раз) возможно получение достаточной информации и, следовательно, возможная дальнейшая обработка результатов измерений по теории вероятностей и математической статистике. Но в условиях эксплуатации получить исчерпывающую статистическую информацию нередко бывает сложной, а порой и невыполнимой задачей из-за ряда существенных ограничений в условиях непрерывного производства (обеспечение технологического процесса). В этом случае дальнейшая обработка результатов измерений ведется на основе теории возможностей.

Методика определения несущей способности металлоконструкций на основе теории вероятностей при линейной зависимости напряжений от нагрузки

При исчерпывающей статистической информации о величине деформации ε и свойствах сталей, в частности модуля упругости стали E , предела текучести σ_T , в исследуемых сечениях можно подобрать и проверить законы распределения случайных величин ε , E , σ_T и надежно определить параметры их распределений. В этом случае используют вероятностные методы определения несущей способности МК.

Вероятностный характер несущей способности МК машин и оборудования металлургического производства вызван воздействием (влиянием) целого ряда внешних и внутренних, активных и пассивных факторов. В связи с этим расчетная несущая способность, выполненная в детерминистической постановке задачи, не совпадает с действительной несущей способностью конструктивного элемента.

Рассмотрим случай, когда имеется исчерпывающая информация об исходных данных ($\tilde{\varepsilon}$, \tilde{E} , $\tilde{\sigma}_T$) для нахождения предельной нагрузки F_{np} , т.е. известны законы распределения и их параметры для случайных величин. После проведения анализа на выброс полученных значений деформаций и других случайных величин находят параметры распределений. Например, для нормального закона распределения это будут среднее значение и среднее квадратическое отклонение [2].

Известно, что статистическое математическое ожидание (среднее значение) деформации будет

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n},$$

где ε_i – значение i -й измеренной деформации;

n – число измерений.

Среднее квадратическое отклонение

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n-1}}.$$

Доверительный интервал (половина ширины)

$$\Delta_\varepsilon = \pm \frac{t_{n-1,\alpha} S_\varepsilon}{\sqrt{n}},$$

где $t_{n-1,\alpha}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа измерений n и уровня значимости α .

Напряжение σ_1 , получаемое в ходе испытаний, определяют по закону Гука: $\sigma_1 = \tilde{\varepsilon} \cdot \tilde{E}$, где $\tilde{\varepsilon}$ является случайной величиной со средним значением $\bar{\sigma}_1 = \bar{\varepsilon} \cdot \bar{E}$ и среднеквадратическим отклонением, найденным с использованием метода линеаризации

$$S_{\sigma_1} = \sqrt{\bar{E}^2 S_\varepsilon^2 + \bar{\varepsilon}^2 S_E^2},$$

где S_E – среднее квадратическое отклонение модуля упругости. Его находят по результатам испытаний образцов. Можно использовать зависимость $S_E = \nu_E \bar{E}_i$. Так как значение ν – коэффициент вариации, в мировой практике принимается равным 0,03, следовательно, можно S_E найти иначе, а именно $S_E = 0,03 \cdot 2,059 \cdot 10^5 = 6,2 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

Будем считать, что $\tilde{\sigma}_1$ изменяется по нормальному закону распределения. Тогда половина ширины доверительного интервала для $\tilde{\sigma}_1$

$$\Delta_{\sigma_1} = \pm \frac{t_{n-1,\alpha} S_{\sigma_1}}{\sqrt{n}},$$

где Δ_{σ_1} – половина ширины доверительного интервала напряжения $\bar{\sigma}_1$ при n числе измерений деформаций ε и уровне значимости α .

Как было отмечено, значение модуля упругости E находят по результатам испытаний образцов. Среднее значение \bar{E} можно также принимать по справочной или нормативной документации. В последнем случае для конструкционной стали модуль упругости принимается $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Значение коэффициента вариации модуля упругости

стали стабильно и составляет $\nu = 0,03$. Таким образом $S_E = \nu_E \cdot E$, например для стали будем иметь $S_E = 0,03 \cdot 2,1 \cdot 10^5 = 6,3 \cdot 10^3$ МПа.

Обычно вырезание заготовок для испытания образцов производится в наименее напряженных участках МК сталеразливочных стенов, что не отражает истинного состояния физико-механических свойств металла в самых опасных (наиболее напряженных) участках МК. Ограниченное число заготовок диктуется требованиями «не навреди», т.е. безопасной эксплуатацией оборудования, что сводит это количество к минимуму и, как следствие, – получение ограниченной статистической информации, затрудняющей анализ результатов испытаний на основе теории вероятностей и математической статистики. В этом случае значения $\bar{\sigma}_T$ принимаются по нормативным документам, а половину ширины доверительного интервала для σ_T принимают равной $\Delta_{\sigma_1} = \pm 2S_{\sigma_T}$ при доверительной вероятности $P = 0,95$ или $\Delta_{\sigma_1} = \pm 3S_{\sigma_T}$ при доверительной вероятности $P = 0,99$. При нормальном законе распределения $\tilde{\sigma}_T \cdot S_{\sigma_T}$ – значение среднеквадратического отклонения предела текучести также можно найти как $S_{\sigma_T} = \nu_{\sigma_T} \cdot \bar{\sigma}_T$, где ν_{σ_T} – коэффициент вариации предела текучести. Известно, что для стали он колеблется в интервале $\nu_{\sigma_T} = 0,05 \div 0,07$, а $\bar{\sigma}_T$ находится по нормативной литературе. Далее строится диаграмма «нагрузка – напряжения», представленная на рис. 3, при линейной зависимости между нагрузкой \tilde{F} и напряжением $\tilde{\sigma}$.

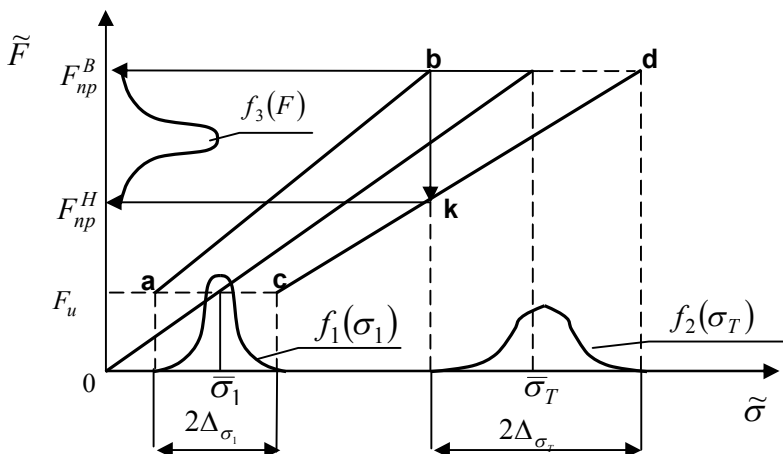


Рис. 3. Диаграмма $F - \sigma$, $f_i(x_i)$ – плотность вероятности распределения \tilde{x}_i

Диаграмма строится в осях координат $\tilde{F} - \tilde{\sigma}$. На оси ординат откладывается значение испытательной нагрузки F_u . Нагрузка будет наименьшей (более экономичной и безопасной) при загрузке конструкции в том месте, в котором она вызовет наибольшие усилия, например, в середине пролёта балки при изгибе. Учитывая постоянство значения и место приложения нагрузки F_u , будем считать ее детерминированной величиной.

Границы доверительного интервала Δ_{σ_1} для $\tilde{\sigma}_1$ откладывают на оси σ и переносят их на прямую $F = F_u$. Считая зависимость напряжений от нагрузки линейной, через точку $(\bar{\sigma}_1, F_u)$ и начало координат проводят прямую (луч).

Если необходимо убедиться в линейной зависимости между F и σ , то проводят испытания при нескольких различных нагрузках и по найденным точкам (σ, F) принимают решение о виде зависимости между ними. Затем откладывается значение σ_T ($\sigma_{0,2}$) для стали консолей стенда. Принимая условную диаграмму $\sigma - \epsilon$, по Прандтлю находят точку пересечения луча в осях координат $F - \sigma$ с прямой (или $\sigma = \bar{\sigma}_B$). Откладывают от нее значение Δ_{σ_T} параллельно оси σ и проводят доверительные границы ac и bd , как показано на рис.3. Из левой точки b доверительного интервала Δ_{σ_T} опускают вертикаль до нижней доверительной границы и через полученную точку пересечения проводят горизонталь до пересечения с осью F .

Полученная точка на оси ординат укажет нижнее значение предельной нагрузки F_{np}^H , пересечение с верхней доверительной границей – верхнее значение предельной нагрузки F_{np}^B .

Из диаграммы $\tilde{\sigma} - \tilde{F}$ видно, что предельная нагрузка \tilde{F}_{np} является случайной величиной, так как зависит от случайных $\tilde{\sigma}_1$ и $\tilde{\sigma}_T$.

Представим эту зависимость в аналитической форме, в виде линейной зависимости

$$\tilde{F}_{np} = k_1 \tilde{\sigma}_1 + k_2 \tilde{\sigma}_T,$$

которую, согласно диаграмме $\tilde{\sigma} - \tilde{F}$, можно представить в виде системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} F_{np}^B &= k_1 \sigma_{1 \min} + k_2 \sigma_{T \min} \\ F_{np}^H &= k_1 \sigma_{1 \max} + k_2 \sigma_{T \max} \end{aligned} \right\},$$

где F_{np}^B ; F_{np}^H – соответственно верхнее и нижнее значения предельной нагрузки, определенные по диаграмме $\tilde{\sigma} - \tilde{F}$.

Решая систему уравнений, находим постоянные k_1 и k_2 .

На их основе находим значение предельной нагрузки $F = \bar{F} \pm \Delta_F$ при определенном уровне значимости α , где \bar{F} – среднее значение предельной нагрузки $\bar{F}_{np} = k_1 \bar{\sigma}_1 + k_2 \bar{\sigma}_T$; Δ_F – половина ширины доверительного интервала $\Delta_F = \frac{S_F \cdot t_{n-1, \alpha}}{\sqrt{n}}$; $t_{n-1, \alpha}$ – коэффициент Стьюдента,

зависящий от числа измерений n и уровня значимости α ; S_F – среднеквадратическое отклонение предельной нагрузки $S_F = \sqrt{(k_1 S_{\sigma_1})^2 + (k_2 S_{\sigma_r})^2}$, где S_{σ_1} и S_{σ_r} – среднеквадратические отклонения экспериментального напряжения и предела текучести.

Методика определения несущей способности металлоконструкций при нелинейной зависимости

Предлагаемый метод отличается от описанного ранее тем, что диаграмма $F - \sigma$ будет криволинейной, которую можно аппроксимировать полиномом $n^{\text{й}}$ степени ($n \geq 2$). В связи с этим испытания балки траверсы проводятся, как минимум, тремя разными по величине нагрузками, каждая последующая испытательная нагрузка больше предыдущей, т.е. должно выполняться условие $F_1 < F_2 < F_3$. Последняя испытательная нагрузка, в данном случае F_3 , может быть меньше или равной той нагрузке, при которой эксплуатируется сталеразливочный стенд.

Затем, после каждого нагружения балки траверсы сталеразливочного стенда нагрузкой F_1 измеряется деформация ε_1 несколько раз. Аналогично поступают при нагружениях конструкции нагрузками F_2 и F_3 .

По полученным значениям средних деформаций $\bar{\varepsilon}_i$ ($i = 1, 2, 3$) и нагрузкам F_i ($i = 1, 2, 3$) строится диаграмма $F - \varepsilon$, и доверительные границы Δ_ε , как показано на рис. 4. Значение предельной деформации $\varepsilon_{0,2}$, соответствующее условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$, принимается из нормативной литературы. В частности диаграмма аппроксимируется полиномом второй степени $\tilde{F}_{np} = A + B\tilde{\varepsilon} + C\tilde{\varepsilon}^2$. Применяя метод наименьших квадратов, получим систему уравнений для нахождения коэффициентов А, В, С.

$$\left. \begin{aligned} nA_j + B_j \sum \varepsilon_{ij} + C_j \sum \varepsilon_{ij}^2 &= \sum F_i \\ A_j \sum \varepsilon_{ij} + B_j \sum \varepsilon_{ij}^2 + C_j \sum \varepsilon_{ij}^3 &= \sum F_i \varepsilon_{ij} \\ A_j \sum \varepsilon_{ij}^2 + B_j \sum \varepsilon_{ij}^3 + C_j \sum \varepsilon_{ij}^4 &= \sum F_i \varepsilon_{ij}^2 \end{aligned} \right\}$$

где i – номер опыта (испытания), в нашем примере $i = 1, 2, 3$ (см. рис. 4);
 j – номер кривой, число которых в нашем примере равно трем ($j = 1, 2, 3$);
 n – число испытаний или число пар (F_i, ε_i) .

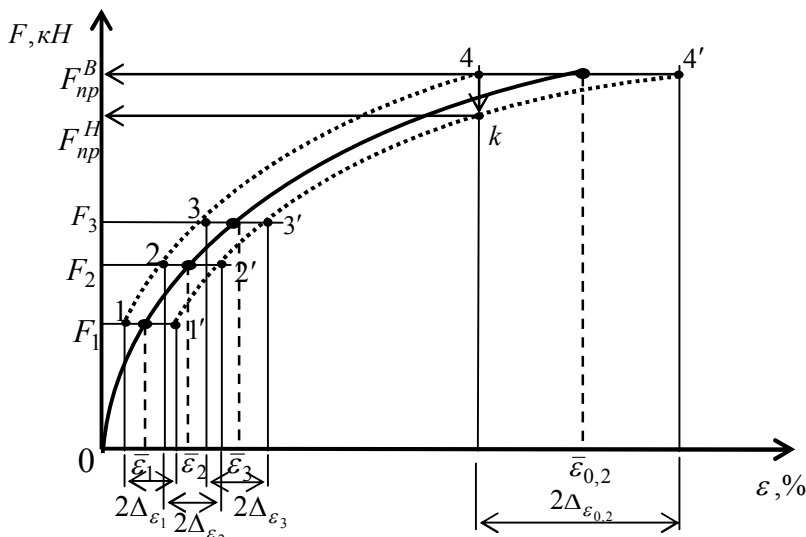


Рис. 4. Диаграмма $F - \varepsilon$ при неизвестном $\Delta_{\varepsilon_{0,2}}$

Такие же кривые строят по точкам доверительных интервалов в виде доверительных границ. Если же $\Delta_{\varepsilon_{0,2}}$ известно по результатам испытания образцов, изготовленных из заготовок испытываемой МК, то в этом случае имеем две экспериментально полученные дополнительные точки 4 и 4', как показано на рис. 5.

В связи с тем, что результатов испытаний, как показала практика наших испытаний, мало (3-4 при каждом F_i), то анализ неопределенностей осуществляется методами теории возможностей. По этой теории среднее значение деформации при одном значении F_i находится по условию $\bar{\varepsilon}_i = (\varepsilon_{i \max} + \varepsilon_{i \min}) / 2$, ($i = 1, 2, 3$), а доверительный интервал

$2\Delta_{\varepsilon_i} = \varepsilon_{i \max} - \varepsilon_{i \min}$, $\varepsilon_{i \max}$ и $\varepsilon_{i \min}$ – граничные значения доверительного интервала. Для полиномов более высокой степени число испытательных нагрузок F_i и число испытаний соответственно увеличивают.

Нахождение значений F_{np}^B и F_{np}^H осуществляется по построенным диаграммам $F - \varepsilon$ геометрически, как показано на рис. 4 или рис. 5.

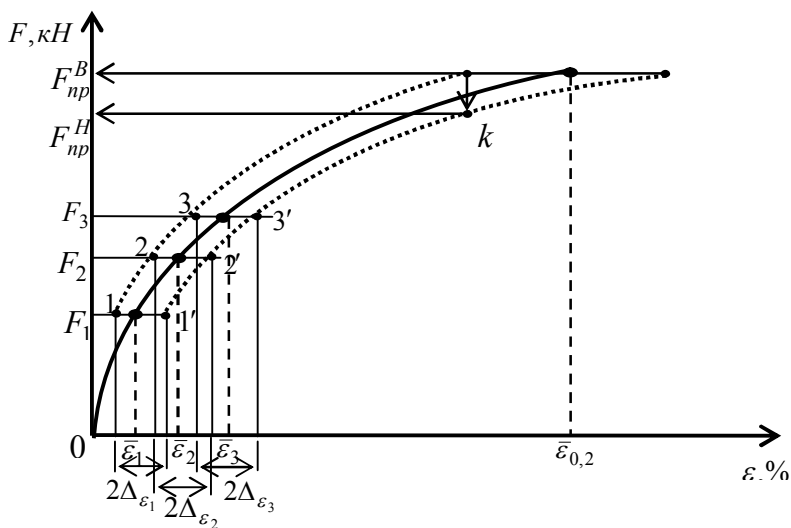


Рис. 5. Диаграмма $F - \varepsilon$ при известном $\Delta_{\varepsilon_{0,2}}$

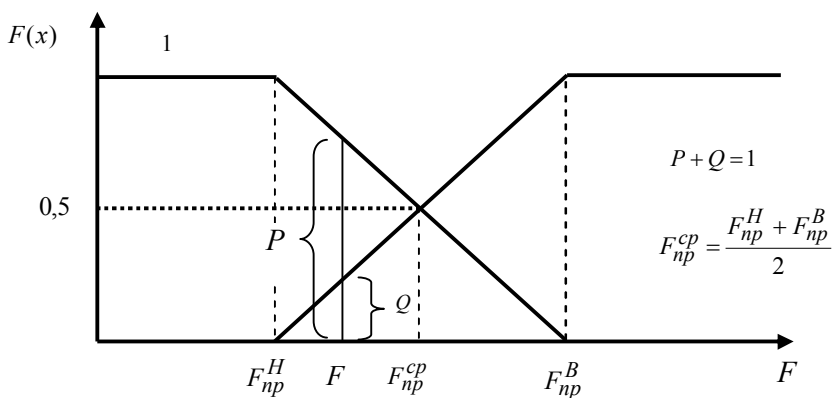


Рис. 6. Равномерный закон распределения

Предполагаем, что \tilde{F}_{np} изменяется по равномерному закону распределения с известными F_{np}^B и F_{np}^H , как показано на рис. 6. Известно, что с точки зрения теории вероятностей в условиях полной неопределенности гипотеза о равномерном распределении вероятности измеряемой величины на некотором интервале ее значения является универсальным способом учета дефицита информации. В данном случае рассматривается интервал $[F_{np}^H; F_{np}^B]$.

Рассматривается вероятность того, что эксплуатационная нагрузка $F_{\mathcal{E}}$ меньше предельной ($F_{\mathcal{E}} < \tilde{F}_{np}$).

При $F_{\mathcal{E}} < F_{np}^H$ вероятность безотказной работы $P = 1$, а вероятность отказа $Q = 0$.

При $F_{np}^H \leq F_{\mathcal{E}} \leq F_{np}^B$ вероятность безотказной работы $0 < P < 1$, а вероятность отказа $Q = 1 - P$.

При $F_{\mathcal{E}} > F_{np}^B$ вероятность безотказной работы $P = 0$, а вероятность отказа $Q = 1$.

Таким образом, проблема оценки технического состояния несущих МК сталеразливочных стенов актуальна из-за большого числа объектов, отработавших нормативный срок, и из-за отсутствия методик неразрушающего контроля для получения достоверной информации о несущей способности МК, по оценке надежности МК и достоверного определения остаточного ресурса.

Разработка и применение методов, позволяющих определять несущую способность, надежность и ресурс МК сталеразливочных стенов машин непрерывного литья заготовок металлургического производства, экономически целесообразны и необходимы по условию безопасности производства и возможности выявления резерва несущей способности.

Библиографический список

1. Уткин В.С. Прогнозирование долговечности материалов и конструктивных элементов при ограниченной статистической информации / В.С. Уткин, Д.А. Погодин // Конструкции из композиционных материалов. – 2003. - №1. - С.71-74.
2. Горев В.В. Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций: Учеб. пособие / В.В. Горев, В.В. Филипов, Н.Ю. Тезиков. – М.: Высшая школа, 2002. – 206 с.