

використання опаленої води що використовується в процесі охолодження промислового обладнання (плавильні печі та ін.) для потреб опалення та теплопостачання об'єкту;

використання теплоти високотемпературних і нагрітих запиленних технологічних і вентиляційних газів що отримані внаслідок технологічних процесів обпалу сировини, промислових сушарок тощо;

використання теплової енергій, що є побічним продуктом роботи компресорних установок стисненого повітря.

Обґрунтування вибору виду палива та теплогенераторів при проектуванні автономного теплопостачання окремих об'єктів виробничого та цивільного призначення при відсутності чи відмові від централізованого теплопостачання.

Висновки. Відповідно до наведеного можна зробити висновок, що на даний час підприємства гірничо-металургійного комплексу України мають велику потребу та значний потенціал зменшення споживання теплової енергій за рахунок використання теплоти джерел високотемпературних та нагрітих викидів і скидів, що практично не використовується через відсутність ефективних технологій та теплообмінних апаратів, які можуть забезпечити високу ефективність теплоутилізації та достатні експлуатаційні показники. Крім того, при визначенні та виборі напрямку дій щодо підвищення енергоефективності систем теплоспоживання, мікроклімату та забезпечення нормованих параметрів технологічних процесів обов'язковим є виконання робіт з поглибленого енергоаудиту та виконання науково-дослідних робіт з вибору та обґрунтування ефективності проектних і конструкторських рішень за напрямком «Енергозбереження і підвищення енергоефективності» для систем опалення, вентиляції, аспірації, тепло- та газопостачання при будівництві, реконструкції та технічному переоснащенні об'єктів.

Список літератури

1. Закон України «Про енергозбереження» №74/94-ВР, 1994.
2. Енергетична стратегія України на період до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. N 145-р)
3. ДБН В 2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К.: Мінрегіонбуд України, - 2013 - 141 с.
4. ДСТУ 2804-94 Енергобаланс промислового підприємства. Загальні положення. Терміни та визначення.
5. **Богуславский Л.Д., Ливчак В.И.** Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1990.624с
6. **Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.Н.** Энергосбережение в газифицированных котельных установках путем глубокого охлаждения продуктов сгорания // Теплоэнергетика. 2000. № 1. С. 59-61.
7. **Нимич Г.В., Михайлов В.Н.** Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Учеб.пособие, К.: 2003. - 630 с.
8. **Кудинов А.А.** Тепло- и массообмен в конденсационных теплоутилизаторах поверхностного типа // Энергосбережение. Ульяновск: Изд-во «Пресса», 1999. Выпуск № 2. С 67-70.
9. **Богуславский А.Д.** Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции. - 5-е изд. М. : Стройиздат, 1985.-336 с.

Рукопис подано до редакції 22.03.16

УДК 621.874

С.І. САХНО, Л.О. ЯНОВА, О.В. ПИЩИКОВА, кандидати техн. наук, доц.
Криворізький національний університет.

ОСОБЛИВОСТІ БЕЗАВАРІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ СУЧАСНИХ МОСТОВИХ КРАНІВ

Розглянуто вплив механічних характеристик сучасних високоміцних сталей і методів розрахунку із застосуванням САПР на надійність металевих конструкцій мостових кранів. Однією з основних причин аварій кранових конструкцій є крихке руйнування. Повторно-змінні навантаження створюють можливість появи прихованих тріщин втомного характеру, які потім призводять до крихкого руйнування. Імовірність крихкого руйнування в значній мірі залежить від матеріалу, що застосовується при створенні кранової конструкції і методів розрахунку, що застосовуються при проектуванні даних конструкцій. У сучасній практиці для виготовлення кранів прийнято застосовувати високоміцні сталі. Сучасні технології дозволяють отримати сталі з межею пластичності до 1100МПа. Застосування сучасних високоміцних сталей дозволяє досягти суттєвого економічного та екологічного ефекту. Але при всіх позитивних якостях високоміцні сталі більш схильні до утворення тріщин при роботі в умовах повторно-змінних наван-

тажень. Ще однією особливістю сучасних кранів є те, що для їх розрахунку використовуються системи автоматизованого проектування. Застосування САПР при проектуванні конструкцій дозволяє використовувати сталь на межі її міцності. У поєднанні із застосуванням високоміцних сталей, це дозволяє значно знизити металоємність конструкції, але, одночасно, істотно підвищує ризик утворення тріщин в проблемних зонах крана. В умовах, коли матеріал працює на межі механічних можливостей, на надійність конструкції може вплинути навіть незначне зменшення площі перетину при одноосовому розтягненні матеріалу. Для мінімізації впливу розглянутих факторів на безпечну експлуатацію металевих конструкцій мостових кранів в роботі запропоновано ряд рекомендацій.

Ключові слова: мостовий кран, утворення тріщин, високоміцна сталь, САПР, надійність конструкції крану.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Крани є невід'ємною частиною вантажно-розвантажувальних і складських робіт. У цехах підприємств, складах, портах найбільшого поширення набули мостові крани, за допомогою яких проводиться підйом і опускання важких вантажів, а також їх переміщення. Застарілий парк підйомних машин поступово змінюється сучасною технікою. Сучасні технології виробництва є дуже складними та просунутими і відповідно базуються на використанні комплексу складних машин. Ці машини вимагають величезних фінансових коштів, для закупки, експлуатації та обслуговування. Тому вкладаючи ці кошти, користувач сподівається на тривалу і безпроблемну експлуатацію.

Довговічність і надійність кранів - основна вимога при їх експлуатації. Надійність крана, перш за все має на увазі надійність його металевої конструкції. Крани з високою надійністю конструкції дозволяють в повній мірі виконувати в заданий термін необхідні обсяги робіт. Такі крани забезпечують безпечні умови праці для машиніста і обслуговуючого персоналу. В зв'язку з цим надійність металоконструкцій кранів має як економічний так і соціальний ефект. Дослідження надійності кранових металоконструкцій є актуальними особливо в зв'язку з застосуванням нових конструкційних матеріалів та нових методів розрахунку конструкцій.

Аналіз досліджень і публікацій. Питаннями надійності і безпеки, оцінки і прогнозування технічного стану механічних систем, в тому числі і металевих конструкцій кранів займалися - В.В. Болотін [1], В.І. Брауде [2], М.М. Гохберг [3], С.А. Казак [4], А.А. Короткий [5], В.С. Котельников [6], А.Н. Орлов [7], Н.Н. Панасенко [8], В.И. Сероштан [9], С.А. Соколов [10], К.В. Фролов [11], і ін. Висновки і рекомендації наведені в даних роботах ґрунтуються на дослідженнях і досвіді експлуатації кранових конструкцій виготовлених з конструкційних матеріалів і розрахованих за методами застосовуваних у відповідні періоди часу. Однак, у зв'язку з бурхливим розвитком технологій, в даний час відбувається суттєве оновлення як використовуваних в кранових конструкціях матеріалів, так і методів розрахунків металоконструкцій. Особливістю сучасних мостових кранів є те, що для виготовлення їх металевих конструкцій використовуються високоміцні сталі, а розрахунки здійснюється із застосуванням систем автоматизованого проектування і методу кінцевих елементів.

Постановка завдання. Основною ціллю дослідження є визначення особливості впливу на надійність кранових металоконструкцій застосування сучасних високоміцних сталей спільно з застосуванням систем автоматизованого проектування.

Викладання матеріалу та результати. Однією з основних причин аварій кранових конструкцій є крихке руйнування [12]. Як правило, крихке руйнування відбувається за рахунок тріщиноутворення в місцях локалізації пружно-пластичних деформацій, що в свою чергу відбувається в місцях концентрації напружень. Основний фактор, що сприяє крихкому руйнуванню - температура експлуатації. Зі зниженням температури стійкість металоконструкції знижується. Виникненню тріщин сприяють і ударні короточасні навантаження, які ускладнюють розвиток пластичних деформацій в зоні концентраторів. Повторно-змінні навантаження створюють можливість появи прихованих тріщин втомного характеру, які потім призводять до крихкого руйнування. Імовірність крихкого руйнування в значній мірі залежить від матеріалу, що застосовується при створенні кранової конструкції і методів розрахунку, що застосовуються при проектуванні даних конструкцій. Розглянемо кожний фактор окремо.

Особливості застосування високоміцних сталей

До останнього часу для виробництва металоконструкцій кранів найбільш поширеною була сталь Ст3, яка має досить високі механічні властивості, пластичність, гарну зварюваність і не піддається загартуванню. Для металоконструкцій кранів великої вантажопідйомності, а також кранів північного виконання застосовувалися низьколеговані сталі (09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД та ін.), що мають в порівнянні зі сталлю Ст3 більш високі механічні властивості, підвищену стійкість проти атмосферної корозії і меншу холодноламкість (табл. 1, рис. 1).

Механічні характеристики сталей, що застосовуються при виробництві металоконструкцій мостових кранів

Група міцності	Марка сталі	Межа плинності МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %
Звичайної	ВСт3пс; ВСт3сп	185-285	365-390	25-27
Підвищеної	09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД	295-390	430-540	19-20

Застосовувані при виробництві вітчизняних кранів сталі мають виражений майданчик плинності (рис. 1). У ряді випадків це дозволяє компенсувати помилки в конструюванні металоконструкцій.

За рахунок плинності та високої деформативності у проблемних зонах з високою концентрацією напружень метал тече, перерозподіляючи тим самим напругу по всьому елементу конструкції.

Для традиційних сталей характерна велика ударна в'язкість і висока енергія тріщиноутворення, що попереджає раннє утворення тріщин внаслідок втоми металу. Дані метали досить добре поведуться при низьких температурах.

У сучасній практиці для виготовлення кранів прийнято застосовувати високоміцні сталі. Застосування високоміцної листової сталі викликано наступними причинами [13]:

економічні: за рахунок збільшення міцності сталі можуть бути зменшені перетини та розміри конструктивних елементів.

Це може істотно зменшити витрати на виготовлення і монтаж конструкції;

дизайн: розмір конструктивних елементів може бути зменшений, що дозволяє створювати елегантні та естетичні конструкції, які краще вписуються в навколишнє середовище;

екологія: застосування меншої кількості сталі означає скорочення споживання обмежених ресурсів.

Відомі два шляхи підвищення міцності сталі: легування і термообробка.

За рахунок введення легуючих добавок міцність сталі може бути підвищена досить легко.

Але, при цьому погіршуються технологічні характеристики металу, такі як зварюваність, ковкість і т.і. Термічна обробка впливає на мікроструктуру і розмір зерна.

Основна перевага цього способу полягає в досягненні дрібнозернистої структури, що призводить до більш високої міцності, а також кращої ударної в'язкості матеріалу.

Тому при розробці нових марок сталі особлива увага приділяється термічній обробці.



Рис. 1 Діаграма розтягування сталей 1 ВСт3сп; 2 09Г2С; 3 високоміцні сталі

Для листового металу міцну сталь отримують шляхом звичайної гарячої прокатки, з наступною нормалізацією - нагріванням вище точки фазового переходу (температура при якій ферито-перлітна структура повністю переходить в аустенітну) з подальшим повільним охолодженням, що приводить до тонкої і однорідної зернистої структури.

Даний процес може бути замінений нормалізуючою прокаткою, що призводить до

аналогічного результату.

Фактично, на першому етапі отримують міцну мартенситову або бейнітову структуру зерна, міцність якої значно поліпшується в процесі термообробки.

Крім цього, для досягнення кращого балансу між міцністю і ударною в'язкістю сталь легують мікролегуючими елементами (ванадієм, титаном, ніобієм), що формують дрібнозернисті карбонітриди.

На сьогодні дана технологія дозволяє отримати сталі з межею плинності 1100 МПа, але стандартом регламентуються лише сталі з межею плинності до 960 МПа.

У сучасному кранобудуванні серед високоміцних сталей найбільш поширеною є сталь S690Q, що має межу плинності 690 МПа (табл. 2).

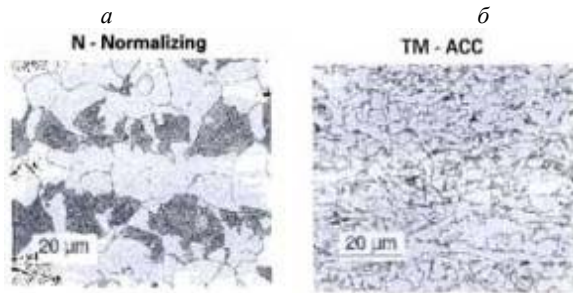


Рис. 2 Різниця в структурі звичайної –а і високоміцної –б сталі

Але поряд з явними перевагами, високоміцні сталі мають ряд недоліків. Перш за все, дані сталі відрізняються відсутністю майданчику плинності (рис.3) [12]. У зв'язку з цим точно вказати напруження, при якому виникають пластичні деформації практично неможливо. Як уже зазначалося, при застосуванні традиційних сталей, в місцях постійної концентрації напружень спостерігається повзучість металу, що призводить до перерозподілу напружень всередині небезпечної ділянки і, в кінцевому підсумку підвищення надійності конструкції. Для високоміцних сталей даний процес ускладнений і локальні концентрації напружень провокують утворення тріщин.

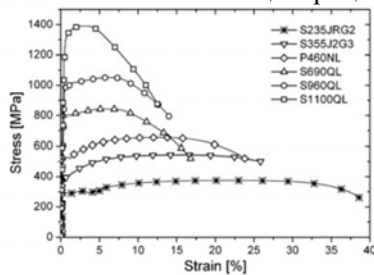
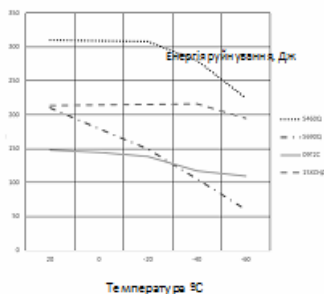


Рис. 3 Діаграма розтягування високоміцних сталей

Іншим недоліком високоміцних сталей є істотне зниження ударної в'язкості при зниженні температури навколишнього середовища [14] (рис.4).

В умовах експлуатації України, де температура повітря інколи знижується до -30 градусів даний недолік досить вагомий. Адже при зниженні температури значно збільшується ризик тріщиноутворення і крихкого руйнування.

Рис. 4 Залежність ударної міцності високоміцних сталей від температури



Крім перерахованих недоліків, можна виділити ще декілька.

Для елементів кранових конструкцій, що працюють в умовах циклічних навантажень, ключовим параметром надійності є запобігання утворення тріщин. Високоміцні сталі в цьому сенсі не є кращими матеріалами. Дослідження [15] показали, що склад і структура високоміцних сталей роблять їх схильними до утворення тріщин.

З огляду на те, що підвищення міцності сталі досягається насамперед за рахунок поліпшення її мікроструктури, термічний вплив на метал при зварюванні може викликати істотне погіршення його механічних характеристик [16]. Крім того, в місцях зварювання можливе утворення концентраторів напружень.

Особливості застосування автоматизованих систем проектування

Для розрахунку кранів в різні періоди часу застосовували два методи розрахунку: по напрузі, що допускається (The allowable stress method) і за граничними станами (The limit state method) [17]. Перший метод заснований на припущенні, що появи граничного стану за міцністю, стійкістю форми і положення, довговічності і т.і. можна запобігти, підбираючи відповідний коефіцієнт запасу (коефіцієнт безпеки). Однак для розрахунку кранових конструкцій даний метод не отримав широкого поширення через недоліки, що обумовлюють його протиріччя з сучасними вимогами кранобудування.

Відповідно до методу розрахунку за граничними станами замість єдиного коефіцієнта запасу міцності, що застосовувався раніше використовується кілька, які враховують особливості роботи конструкції, незалежних коефіцієнтів, кожен з яких має певний внесок в забезпечення надійності конструкції і гарантії від виникнення граничного стану.

Характеристики міцності високоміцної листової сталі при товщині листа до 50 мм

Марка сталі	Межа плинності МПа	Межа міцності МПа
S460Q	460	550-720
S500Q	500	590-770
S550Q	550	640-820
S620Q	620	700-890
S690Q	690	770-940
S890Q	890	940-1100
S960Q	960	980-1150

Найбільш повно і послідовно метод розрахунку за граничними станами реалізований в міжнародному стандарті ISO 2394 [18], в якому визначено загальні принципи оцінки та підтвердження надійності конструкцій стосовно їх роботи протягом життєвого циклу.

Однак і метод граничних станів має свої недоліки. Перш за все це неясність у визначенні загального запасу міцності конструкції в цілому, ускладнення в зіставленні розрахункових величин з експериментальними даними. [19]

При розрахунку конструкцій як методом допустимих напружень, так і методом граничних станів конструктор завжди обмежений ступенем розвитку інженерних наук, а глибина і точність розрахунку обмежується наявністю обчислювальних потужностей. Дані обмеження змушували розробляти конструкції з великим запасом міцності, що поряд з підвищенням запасам надійності призводило до підвищення металоємності машин.

Сучасні методи розрахунків застосовані на використанні систем автоматизованого проектування. Практично всі сучасні розрахунки на міцність проводять, використовуючи метод кінцевих елементів. В останні десятиліття він зайняв провідне становище і набув широкого застосування [20]. Сучасні програми здатні врахувати відмінність в роботі зварних, болтових і клепанних з'єднань. Вони можуть розрахувати деформації конструкцій і їх власні частоти коливань.

Сучасні методи проектування дозволяють проектувальникам використовувати сталь на межі її міцності. Але сучасні технології виготовлення кранів не встигають за технологіями виробництва сталі та новітніми методами проектування. Крім того, було б справедливо сказати, що при проектуванні не завжди приділяють належну увагу дрібним деталям і, часом, помилки проектування приводять до погіршення надійності машини.

До помилок при проектуванні призводить і те, що як застосовували раніше, так і сучасні методики розрахунку металевих конструкцій виходять з того, що товщина металу конструкції в процесі експлуатації не змінюється. Однак навіть при одноосьовому розтягуванні елемента конструкції товщина металу буде зменшуватися. За рахунок цього в розтягнутому перерізі при незмінних навантаженнях напруження буде додатково збільшуватися. При цьому граничні розтягування ε_f можуть бути виражені через мінімально допустиму товщину ε_r металу конструкції [21]

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f} \quad (1)$$

Використання цих відносин засноване на тій умові, що деформація металу обмежена в поперечному напрямі і загальний обсяг металу залишається постійним.

При використанні традиційних методів розрахунку, що передбачають великий запас міцності, на зменшення товщини перетину можна не звертати уваги, але застосування методу кінцевих елементів передбачає мінімізацію витрати металу і тому зменшення товщини металу в процесі розтягування може зіграти негативну роль.

Тріщиноутворення при роботі конструкцій мостових кранів

Кранові конструкції працюють в умовах динамічних впливів. Тому в елементах і вузлах конструкцій виникають змінні напруги, які призводять до появи втомних тріщин.

Сучасні технології виготовлення кранів не встигають за технологіями виробництва сталі та новітніми методами проектування. Нові матеріали і нові методи розрахунку не привели до принципової зміни конструкції мостових кранів. Тому і місця утворення тріщин залишилися колишніми. Перш за все це вузли кріплення кутових букс ходових коліс, місця примикання кінцевих балок до головних, місця кріплення навісних елементів до стінок головних балок [22].

Зменшення енергії тріщиноутворення і відсутність майданчика плинності в високоміцних сталях одночасно з мінімізацією перетину конструкції значно підвищує ризик утворення тріщин в небезпечних зонах. Тому тріщини можуть утворюватися набагато раніше, ніж в кранах, виготовлених за старими методами. Це, а також особливості зварювання високоміцних сталей може привести до певних проблем при експлуатації сучасних мостових кранів.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Викладений матеріал дозволяє надати ряд рекомендацій при експлуатації сучасних мостових кранів.

Перш за все в процесі експлуатації необхідно суворо дотримуватися температурного режиму експлуатації і не допускати роботу крана при температурах, нижче обумовлених виробни-

ком. Для зменшення ймовірності утворення тріщин в місцях зварювання високоміцних сталей слід дотримуватися наступних основних правил [13]:

перед зварюванням необхідно прогрівати основний лист. Це важливо, як для зварювання прихватками, так і для основного проходу;

зварювані поверхні повинні бути абсолютно чистими і сухими;

мінімізація усадочних напружень досягається хорошим приляганням зварювальних поверхонь і вибором правильної послідовності маршруту зварювання;

необхідно використовувати електроди з низьким вмістом водню;

Важлива умова для забезпечення довговічної безаварійної роботи крана - проведення регулярних оглядів металоконструкцій особливо в зимовий період року і в традиційних місцях утворення тріщин. Подальших досліджень потребує вивчення надійності елементів металоконструкції кранів, що працюють на межі механічних властивостей матеріалу. Важливим також є визначення наскільки тріщина в тому чи іншому місці може бути безпечною і як довго вона не призведе до катастрофічної відмови. Також важливо визначитись, як часто слід ретельно перевіряти критичні області, щоб запобігти руйнувань в результаті втомних напружень.

Список літератури

1. **Болотин В.В.** Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. - 448 с. ISBN 5-217-00840-7.
2. **Брауде В.И., Семенов Л.Н.** Надежность подъемно-транспортных машин: Учебное пособие. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1986. -183 с.
3. **Гохберг М.М., Семенов В.П.** Усталостные разрушения в металлических конструкциях кранов//Тр. ЛПИ. 1954. - Вып. 3. - с. 110-118.
4. **Казак С.А.** Статистическая динамика и надежность подъемно-транспортных машин: Учебное пособие. Свердловск: изд. УПИ, 1987. -86с.
5. Диагностирование грузоподъемных машин / **В.И. Сероштан, Ю.С Огарь, А.И. Головин** и др.; Под ред. В.И. Сероштана, Ю.С Огаря. -М.: Машиностроение, 1992. 192с.
6. **Короткий А.А., Павленко А.Н.** Определение нагруженности мостовых кранов // Известия ТулГУ. Подъемно-транспортные машины и механизмы. Вып.2. Тула: изд. ТулГУ, 1999. - С.212-219.
7. **Котельников В.С.** Оценка безопасности при эксплуатации кранов мостового типа. Диссерт. канд. техн. наук. Новочеркасск. НГТУ, 1998. -153с.
8. **Орлов А.П.** Основы теории динамического расчета грузоподъемных кранов с пространственными канатными подвесами грузов: Дис. докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 1993. - 475 с.
9. **Панасенко Н.Н., Дементьева Н.М.** Модели прочной надежности сейсмостойких металлоконструкций подъемно-транспортных машин//Изв. Сев.-Кавказ, науч. центра высш. шк. тех. науки. Ростов н/Д 1987. - 24с.
10. **Соколов С.А.** Методические основы прогнозирования долговечности металлических конструкций грузоподъемных машин: Автореф. дис. докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 1995. - 32 с.
11. **Фролов К.В., Махутов Н.А.** Проблемы безопасности сложных технических систем// Проблемы машиностроения и надежности машин. -1992. №5. - с.3-11.
12. **Акименко О.Ю. Логвинов И.Н.** Аварии кранов из-за хрупких разрушений металлоконструкций [Журнал] // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). - Москва : ООО «Евразийское Научное Содружество», 2015 г.. - 10-2 (19). - стр. 75-76.
13. **Steel Oakley High strength steel plate** [В Інтернеті]// Oakley Steel. - 16 июля 2014 г.. - 3 апреля 2015 г.. - <http://www.oakleysteel.co.uk/high-strength-steel-plate>.
14. **Санников И.И. Коврова Д.Ф., Устинов Е.П.** Исследование ударной вязкости конструкционных сталей и сварных соединений, эксплуатирующихся в условиях крайнего севера [Журнал] // Международный научно-исследовательский журнал. - Екатеринбург : ИП Соколова, 2015 г.. - 6-1 (37).
15. **М. Burzić M. Manjgo, J. Bernetić, Z. Burzić, M. Arsić** Effect of variable load on crack initiation microalloyed steel S690-ql [Журнал] // Metalurgija.: Croatian Metallurgical Society, 2015 г.. - 1 (54). - стр. 55-58.
16. **Н. Ismar Z. Burzic, N. J.Kapor, T. Kokelj** Experimental Investigation of High-Strength Structural Steel Welds Strojnikski vestnik [Журнал] // Strojnikski vestnik - Journal of Mechanical Engineering. - 2012 г.. - 6 : #. 58. - стр. 422-428.
17. **В.С. Котельников А.А. Зарецкий, А.Б. Макаров.** Состояние расчетов кранов и основные направления их развития [Журнал] // Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – М. : 2007 г.. - 28. - стр. 67-75.
18. ISO 2394: 1998 (E) General principles on reliability for structures.
19. **В.М. Бондаренко, Д.Г. Суворкин** Железобетонные и каменные конструкции М. Высшая школа, 1987. - с.143
20. **Алямовский А.А.** Solid Works/ Компьютерное моделирование в инженерной практике / **А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов.** - СПб.: БВХ-Петербург. - 2005. - 800 с.
21. **В. Atli-Veltin L. Vredeveldt** Use of Forming Limit Curve as a Failure Criterion in Maritime Crash Analysis [Конференция] // 10th European LS-DYNA Conference. - Würzburg, Germany : 2015.
22. **Концевой Е.М., Розенштейн Б.М.** Ремонт крановых металлоконструкций. М.: Машиностроение, 1979. 206 с.

Рукопис подано до редакції 22.03.16.