

ПЕРЕДУМОВИ ВИРОБНИЦТВА ВУЗЛІВ-КОНЕКТОРІВ БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ЛИВАРНИМ СПОСОБОМ ЗА РАЗОВИМИ МОДЕЛЯМИ

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
²Вінницький національний технічний університет

В статті виконано огляд поширених елементів швидкозбірних модульних будівельних металоконструкцій з переліком їх переваг та оцінкою перспективи виготовлення їх важливих вузлів за разовими моделями ЛГМ-процесом. Будівництво із застосуванням металоконструкцій має всі передумови стати імпульсом та ефективним рішенням в будівельній галузі, що сприятиме відбудові країни. Розглянуто виготовлення вузлів-конекторів та болтових кронштейнів для з'єднання балок та конекторів з гнучкими сталевими пластинами для сейсмічно нестабільних умов. Інститутом ФТІМС НАН України, починаючи з 2011 року, запатентовано ряд каркасно-комірчастих тонкостінних литих конструкцій за моделями з пінополістиролу, що зібрані переважно з елементів, які повторюються, і що аналогічно до сучасного способу монтування збірних будівельних металоконструкцій. Також накопичено досвід лиття методом ЛГМ деталей з литою різьбою, що спрощує серійне виготовлення кульових вузлів сполучення та кінцевих наконечників для трубчастих елементів. При зведенні ангарів і складів з оболонковими склепіннями зниження ваги металевих оболонок з обов'язковим зберіганням їх необхідної міцності є важливою вимогою до проектування таких конструкцій. Для цього, зокрема, для будівельних конструкцій застосовують метод інверсії гнучких висячих сіток, що формуються з плоского стану дією сили тяжіння. З використанням того, що перевернута ланцюгова лінія слугує ідеальним обрисом для арок і куполів, оскільки однорідні арки в формі такої лінії зазнають лише деформації стиснення, але не вигину, було відпрацьовано метод фізичного моделювання опорної поверхні безмоментної склепінчастої оболонки складної криволінійної поверхні способом перевертання провисаючої нагрітої термопластичної синтетичної плівки, що виявилось простіше, ніж за методом перевертання висячих сіток.

Ключові слова: модульні конструкції, будівельні металоконструкції, моделювання, оболонкові конструкції, виливки, заощадження металу, лиття за моделями, що газифікуються.

Вступ

В вітчизняних умовах відбудови країни створення збірних модульних будівельних споруд, як несучих і огорожувальних конструкцій, які швидко монтуються, нині конче актуальне з урахуванням того, що сучасний розвиток будівельного ринку невблаганно скорочує і спрощує процес будівництва, збільшуючи долю будівель з металоконструкцій, які мають наступні переваги.

1. При зведенні будинків не використовуються водні розчини і рідкі суміші, тому будівництво можна вести в зимову пору року.

2. Металеві каркаси і панелі витримують будь-які перепади температури.

3. Розрахунковий термін служби будівель становить 50 років.

4. Будинки мають високу сейсмостійкість і можуть витримати навіть дев'ятибальною землетрус.

5. У будинках і виробничих чи складських приміщеннях можна встановлювати будь-яку систему опалення.

6. Швидкомонтовані будівлі стоять недорого (у порівнянні з цегляними, панельними, монолітними чи дерев'яними будівлями).

7. Швидкість спорудження. Ангари з металоконструкцій, як каркасні, так і безкаркасні зводяться в рази швидше ангарів такого ж розміру з цегли, бетону, з закладкою фундаменту тощо, а також придатні до розбирання і перенесення на нове місце.

Результати огляду та дослідження

Виготовлення металевих збірних модульних споруд полягає в тому, що елементи всієї будівлі чи її частини після виготовлення на заводі в контейнері чи габаритною відправкою подаються на монтаж, де їх найпростішими способами встановлюють у проектне положення. Останнім часом розроблені плоскі й просторові конструкції такого типу у вигляді кроквяних систем, а також циліндричних і кульових склепінь та інші [1]. Популярність каркасних тривимірних металоконструкцій невпинно зростає. Як правило, просторові рами конструюються з простих

збірних одиниць, які часто є стандартними за формою і розміром. Такі модульні одиниці, що масово виробляють на заводах, можуть легко і швидко збиратися на місці навіть малокваліфікованим персоналом. Зокрема, завдяки значній повторюваності металевих стрижнів та вузлів заводське виробництво може бути повністю автоматизовано з досягненням високої якості продукції. Це відповідає поширеній тенденції префабрикації (англ., prefabrication) - перенесення частини будівельних процесів у заводські умови.

Модульне будівництво із застосуванням металоконструкцій має всі передумови стати імпульсом та ефективним рішенням в будівельній галузі, що сприятиме відбудові країни. Очевидно, що в будь-якій збірній системі вкрай важливою частиною є вузол сполучення (так званий конектор), і кінцевий економічний результат безпосередньо співвідноситься з ефективною простотою конструкції конектора. Тому основна технічна складність розвитку таких просторових систем пов'язана з виробництвом вузлових сполучень, як найбільш складних та відповідальних елементів конструкції.

Значний потенціал вирішення проблем як конструктивного, так і технологічного характеру з виготовлення таких вузлових конекторів має ливарне виробництво, а саме: процес лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), в тому числі, шляхом відпрацювання і впровадження у виробництво в ливарних цехах ФТІМС НАН України та діючих вітчизняних підприємствах, на яких фахівцями ФТІМС впроваджено ЛГМ-процес.

Сучасне ливарне виробництво сьогодні орієнтується на істотне зниження металоємності виробів одночасно з ускладненням їх геометрії. За цієї тенденції значний потенціал має процес ЛГМ за разовими моделями з пінополістиролу (ППС). Виняткова легкість обробки ППС, особливо з розповсюдженням і здешевленням 3D-фрезерів, дозволяє досить швидко вирізати моделі високої точності з плит чи прямокутних блоків ППС за програмою комп'ютера і кресленням на екрані монітора. З іншого боку, в пакувальній галузі створено велику гаму високопродуктивного обладнання для автоматизації виробництва за прес-формами будь-яких серій моделей з ППС. Також 3D-друк моделей з удосконаленням технології впритул наблизився до впровадження в ЛГМ з друком моделей практично будь-якої геометричної складності, навіть перевершуючи можливості 3D-фрезерування.

Крім того, процес ЛГМ в вакуумовану контейнерну форму з сухого піску розширив уявлення про конструкцію металевого виливка. З одного боку, відпрацьовано ряд методів виготовлення разових моделей, що мають конструкції складаної геометрії (з розміщенням у піщаній формі без стрижнів) для заміщення їх металом. Розширено ливарну спроможність на тонкостінні складного виду конструкції, зокрема, моделі яких можна збирати з багатьох частин [2]. З іншого боку, сипкий пісок при вібрації форми в процесі його засипання і ущільнення в контейнері за властивостями схожий на «псевдорідину», яка обтікає разову модель з ППС. Дійшли висновку, що, яка буде конструкція металевого виливка, залежить від впливу двох плинних середовищ: одна - метал, що при заливанні заміщує модель зсередини, друга - сипкий пісок, що при формуванні обтікає її поверхню зовні. Звідси сформулювали проблему в такому питанні: «які твердотільні конструкції (мінімальної маси) можуть «пролитися», оптимально (максимально) заповнивши простір в об'ємі піску ливарної форми?». Така концепція (двох плинних середовищ) сприяла конструюванню складнопрофільних виливків, розкриваючи потенціал ливарного процесу. Виходячи із цієї концепції у ФТІМС НАНУ було запатентовано більше десятка каркасно-комірчастих литих металоконструкцій та їх разових моделей, описи яких у вільному доступі є на сайті Укрпатенту, та які висвітлено, в тому числі, в галузевому журналі про металоконструкції для будівництва [2].

Як виявлено внаслідок огляду технічної інформації, серед найбільш поширених болтових з'єднань-конекторів відомий вузол «Меро» (рис. 1, а) [3], запропонований в 1942 р. інженером Менгерінхаузенем в Німеччині. Із застосуванням цього вузла в Югославії було збудовано стадіон «Спліт», який має винятково красиву стрижневу оболонку прольотом понад 200 метрів. При цьому у такому вузлі було використано болт діаметром 64 мм із високоміцної сталі. Крім того, відомі вузли більш простої конструкції, наприклад, на фото і ескізі «Меро-3» (б) [4]. Також показано елементи просторової модульної конструкції «Zublin», два фото (в) [5], схожої на попередню, а також схема збирання модульних конструкцій з болтовими з'єднаннями (г) та шарнірний вузол новітньої просторової стрижневої конструкції з регулюванням як кутів між стрижнями, так і конфігурації всієї цілісної конструкції (д) [6].

Подібна до попередньої «Меро» просторова модульна конструкція «Zublin» (рис. 1 в) у своєму складі має трубчастий стрижень, кульовий конектор, болт з диференційною різьбою та

шестигранну привідну муфту. На сусідньому фото справа - збірка такого просторового каркасу (конектор і стрижень в перерізі).

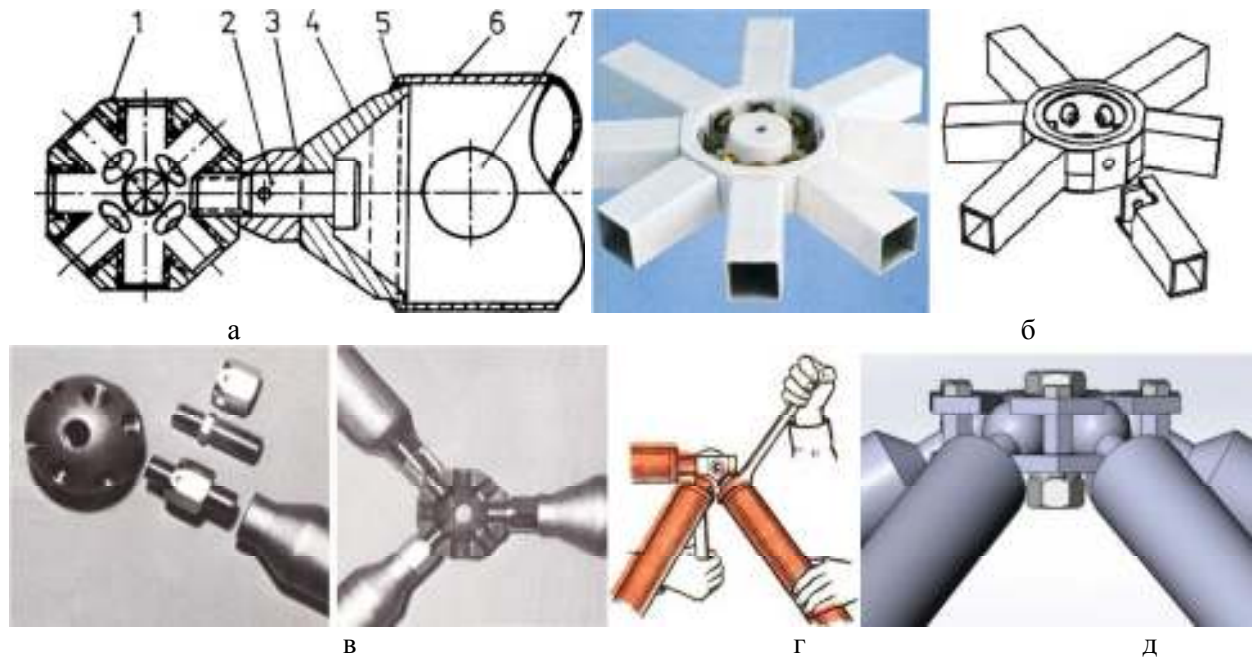


Рисунок 1 – Вузол системи «Меро» (а): 1 - вузловий елемент з різьбовими отворами для болтів; 2 – високоміцний болт; 3 – шестигранна муфта обертання; 4 – конічний наконечник (доцільно – виливок); 5 – зварний шов; 6 – трубчастий елемент; 7 – монтажний отвір. Вузол «Меро-3» (б) [4]; елементи просторової модульної конструкції «Zublin» [5] (в), схема збирання модульних конструкцій з болтовими з'єднаннями (г); та вузол стрижневої конструкції регульованої структури (д) [6].

На рис. 2 показано варіанти кульових вузлів, конічних наконечників, трубчастих елементів однакової довжини з наконечниками і приклад збирання їх у просторову систему; видно, яким методом з однакових, нескладних для транспортування деталей збираються просторові каркасні конструкції значного розміру. Як вузли, так і наконечники найвигідніше лити точним способом ЛГМ з мінімальною механічною обробкою, чи навіть без неї. При цьому кулі виливаються порожнистими з отворами, на яких може виконуватись різьба в литому стані.



Рисунок 2 - Конструкції кульових вузлів, конічних наконечників, трубчастих елементів (упакованих в пакки) і зібраної просторової системи, що пропонуються підприємствами КНР.

Наприклад, для стяжок будівельної опалубки відпрацьовано крупносерійне лиття стальних гайок з різьбою на отворах діаметром від 15-16 мм і більше, а також є досвід виконання при ЛГМ

литої різьби при серійному виготовленні гайок ізоляторів залізничної електромережі [7]. Також в ряді випадків конектори допустимо виливати з високоміцного чавуну [8].

Розвиток модульної технології збільшує число будівельних рішень, а потенціал сталевих конструкцій розкривається в нових сегментах будівельної галузі. Сьогодні програмні комплекси проектування дозволяють змодельовати конструкцію, включно з кріпильними елементами та сполучними деталями та проаналізувати роботу всієї системи.



Рисунок 3 - Застосування сталевих вузлів в опорах навісу перед входом у шпиталь, а також на трубчастій просторовій конструкції на колоні [9].

На рис. 4 показано разові моделі для лиття з металу переважно трубчастих вузлів, ці моделі вирізані з піноплімерів чи надруковані з полімерів 3D-принтером [9]. Такі моделі зручні для ЛГМ і демонструють різновиди конфігурації конекторів для модульних металокопструкцій.



Рисунок 4 - Моделі вузлів різноманітних конфігурацій для модульних металокопструкцій.

На відміну від бетону, зібрані сталеві конструкції не дають усадки чи повзучості. Сталь також міцна і пластична, що робить її дуже стійкою до випадкових пошкоджень. Якщо якісь пошкодження все-таки виникли, їх можна легко відремонтувати за допомогою різання, зварювання або болтів, щоб відновити повну міцність. Монтаж металокопструкцій на місці не обмежений погодними умовами, окрім сильного вітру, і може тривати цілий рік, без потреби в спеціальних заходах захисту взимку. Литі болтові кронштейни (рис. 5 з сайту компанії Cast Connex, www.castconnex.com) для з'єднання спеціальних і проміжних сталевих каркасів можуть використовуватись при модернізації сейсмічно стійких сталевих каркасних будівель або в новому будівництві.

Швидке болтове з'єднання виключає зварювання в польових умовах (що знижує витрати на монтаж і спеціальний контроль), а при використанні в новому будівництві полегшує монтаж каркаса. Конектори (рис. 5, б) створюють фермову систему, яка протистійє бічним силам та розсіює сейсмічну енергію в металокопструкціях, які набувають властивості заданої пластичності.

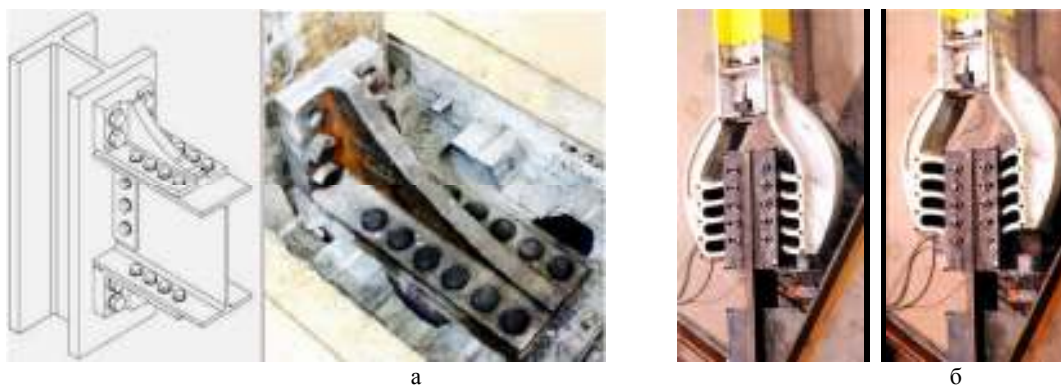


Рисунок 5 - Литі болтові кронштейни для перпендикулярного з'єднання балок (а) та конектори з гнучкими сталевими пластинами для сейсмічно нестабільних умов (б), показано можливість деформації.

На рис. 6 показано приклади литих сталевих вузлів-конекторів трубчастого типу з сайту www.castconnex.com (а, б), а також виливки, що виготовлені методом ЛГМ у ФТІМС НАН України (в). Останнє фото свідчить про достатній рівень вітчизняної технології ЛГМ для переходу до серійного лиття такого роду конекторів для будівельних металоконструкцій.



Рисунок 6 - Трубчасті вузли: зовнішній вигляд очищеного виливка (а); видалення такого виливка з піщаної форми (б) та виливки, що виготовлені методом ЛГМ у ФТІМС НАН України (в).

Окремо розглянемо зведення ангарів і складів з оболонковими, циліндричними чи кулястими склепіннями [1]. Спільна оптимізація металоконструкції і технології її виготовлення з метою досягнення максимального коефіцієнта використання металу запропонована на прикладі оболонкових конструкцій [10]. Перевернута ланцюгова лінія слугує ідеальним обрисом для арок і куполів, оскільки однорідна арка в формі такої лінії зазнає лише деформації стиснення, а не вигину, що застосовують в будівництві.

Зокрема, для будівельних конструкцій при оптимізації оболонок у тривимірному вимірюванні застосовується метод інверсії гнучких висячих сіток, що формуються з плоского положення під дією сили тяжіння. Такий метод фізичного моделювання опорної поверхні безмоментної склепінчастої оболонки складної криволінійної поверхні реалізують як метод перевертання висячих сіток [11].

Однак запропоновані сьогодні висячі сітки – це спеціальні гнучкі, досить дорогі конструкції, що розтягуються [9] на обмежену величину, з плоского положення яких часто складно сформувати під дією сили тяжіння оболонку необхідної опуклості при закріпленні її над отвором довільної форми. Тому для оболонкових конструкцій за аналогією до моделювання методом перевертання висячих сіток нами розроблено моделювання методом перевертання провисаючої нагрітої термопластичної синтетичної плівки.

Для випробувань останнього способу у ФТІМС НАНУ використовували поліетиленову плівку або плівку севілен марки 11304-075, ТУ 6-05-1636-97, яка часто застосовується (при не менше 6-кратному видовженні) для облицювання модельних комплектів у випадку вакуумного формування. Товщина плівки – в межах 75–100 мк. Плівка при нагріванні до пластичного стану провисала під власною вагою. Випробовували на прикладі моделювання форми кришки люка поліетиленовою плівкою, закріпивши її в отворі і нагріваючи ґратами з трубчастих електронагрівачів (ТЕН). Коли плівка провисала на необхідну відстань, її фотографували збоку для обробки зображення на комп'ютері. Величину провисання регулювали зміною температури ТЕНів або величиною відстані

їх наближення до плівки. Для глибокого провисання допустиме застосування нагрівачів інфрачервоного випромінювання або іншого типу. Плівка легко закріплюється по краю отвору будь-якої конфігурації, а подібна технологія нагрівання добре відпрацьована в ливарництві для процесу вакуумного піщаного формування. Це спрощує моделювання без застосування висячих сіток особливої конструкції зі спеціальними властивостями і складним процесом регулювання ступеня їх провисання. Також запропоновано комп'ютерне моделювання аналогічним методом з застосуванням математичних виразів для опису провисаючої ланцюгової лінії чи оболонки з такими обрисами.

Висновки

Виконано огляд поширених елементів швидкозбірних модульних будівельних металоконструкцій з переліком їх переваг та оцінкою перспективи виготовлення їх важливих вузлів за ЛГМ-процесом. Таке будівництво із застосуванням металоконструкцій має всі передумови стати імпульсом та ефективним рішенням в будівельній галузі, що сприятиме відбудові країни. У відділі проф. О.Й. Шинського, починаючи з 2011 р., запатентовано ряд каркасно-комірчастих тонкостінних литих конструкцій за моделями з ППС, що зібрані переважно з елементів, які повторюються, і що аналогічно до сучасного способу монтування збірних будівельних металоконструкцій. Також накопичено досвід лиття методом ЛГМ деталей з литою різьбою, що спрощує серійне виготовлення кульових вузлів сполучення та кінцевих наконечників для трубчастих елементів [7]. При зведенні ангарів і складів з оболонковими склепіннями зниження ваги металевих оболонки з обов'язковим зберіганням їх необхідної міцності є важливою вимогою до проектування таких конструкцій. Для цього, зокрема, для будівельних конструкцій застосовують метод інверсії гнучких висячих сіток, що формуються з плоского стану дією сили тяжіння. З використанням того, що перевернута ланцюгова лінія слугує ідеальним обрисом для арок і куполів, оскільки однорідні арки в формі такої лінії зазнають лише деформації стиснення, але не вигину, було відпрацьовано метод фізичного моделювання опорної поверхні безмоментної склепінчастої оболонки складної криволінійної поверхні способом перевертання провисаючої нагрітої термопластичної синтетичної плівки, що виявилось простіше, ніж за методом перевертання висячих сіток.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хоменко О.Г. Сталеві конструкції у будівництві: - Підручник. Глухів, 2018. - 347 с.
2. Дорошенко В.С. Металлические ячеисто-каркасные отливки по аналогам из живой и неживой природы // Металлические здания. 2010. №1. - С. 32 – 35.
3. Демидов Н., Меликова В. Пространственные стержневые конструкции. URL: <https://in-regional.ru/realizatsiya-stroitelstva/proektnaya-dokumentatsiya/prostranstvennyye-sterzhnevyye-konstruktsii.html>.
4. S. Stephan, J. Sánchez-Alvarez, K. Knebel. Reticulated Structures on Free-Form Surfaces. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228563882>.
5. Пушкин Б. А. Пространственные каркасы «КК». Нюрнберг, 2022. URL: <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/Buch/BP.pdf>.
6. Патент 2586351 РФ, МПК E04B1/58. Шарнирный узел пространственной стержневой конструкции регулярной структуры. Опубл. 10.06.16, Бюл. №16.
7. Дорошенко В.С., Янченко О. Б. Застосування методу армування пінополістирольних моделей до 3D-друку стін з полістиролбетону та приклади металевих литих деталей будівельної опалубки // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві (СучТехнБудів). 2021. Том. 31. № 2. - С. 16–21. Чер 2022.
8. Савуляк В. І., Янченко О. Б. Економічні технології високоміцних графітізованих сплавів заліза: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 160 с.
9. How to specify cast steel tree nodes. Sep 25, 2019. URL: <https://www.castconnex.com/blog/how-to-specify-cast-steel-tree-nodes>.
10. Дорошенко В. С., Шинский В. О. Моделирование отливок как оболочковых конструкций с целью металлосбережения // Металл и литье Украины. 2015. № 6. - С. 30 - 34.
11. Козлов Д. Ю. Топологический метод создания физических моделей точечных поверхностей // МАРХИ. 2008. № 1. URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/1kvart08/Kozlov/article.php>.

REFERENCES

1. Homenko O.G. Steel structures in construction: - Textbook. Gluhiv, 2018. - 347 s.
2. Doroshenko V.S. (2010). Metal honeycomb-frame castings according to analogues from living and inanimate nature // Metallicheskie zdaniya. 2010. №1. - S. 32 – 35.
3. Demidov N., Melikova V. Spatial bar structures. URL: <https://in-regional.ru/realizatsiya-stroitelstva/proektnaya->

- dokumentatsiya/prostranstvennye-sterzhnevye-konstruktsii.html. [in Russian]
4. S. Stephan, J. Sánchez-Alvarez, K. Knebel. Reticulated Structures on Free-Form Surfaces. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228563882>.
 5. Pushkin B. A. Spatial frameworks "KK". Nyurnberg, 2022. URL: <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/Buch/BP.pdf>.
 6. Pat. 2586351 RF: MPK E04B 1/58. Hinge assembly of a spatial rod structure with a regular structure, Tsaritova, N.G., Busalo, N.A., Publ. 10.06.16.
 7. Doroshenko V. S., Yanchenko O.B. Application of the method of reinforcing polystyrene models to 3d printing of walls made of polystyrene concrete and examples of metal cast parts of building formwork // Modern Technology, Materials and Design in Constructijn. 2021. Vol. 31. № 2. - P. 16–21.
 8. Savulyak V.I., Yanchenko O.B. Economic technologies of high-strength graphitized iron alloys: monograph. - Vinnytsia: VNTU, 2014. 160 p.
 9. How to specify cast steel tree nodes. Sep. 25, 2019. URL: <https://www.castconnex.com/blog/how-to-specify-cast-steel-tree-nodes>.
 10. Doroshenko V. S., Shinskij V. O. (2015). Modeling of castings as shell structures for the purpose of metal saving // Metall i lite Ukrainy. №6. - S. 30 - 34.
 11. Kozlov, D. Yu. Topological method for creating physical models of point surfaces // MARCHI. 2008. № 1. <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/1kvart08/Kozlov/article.php>.

Дорошенко Володимир Степанович – д-р техн. наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), e-mail: doro55v@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0070-5663.

Янченко Олександр Борисович – кандидат техн. наук/ Ph.D., доцент, кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, e-mail: 1961yab@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3888-3772.

V. Doroshenko¹
O. Yanchenko²

PREREQUISITES FOR THE PRODUCTION OF CONNECTOR ASSEMBLIES OF BUILDING METAL STRUCTURES BY FOUNDRY METHOD ACCORDING TO ONE-TIME PATTERNS.

¹Physical and Technical Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
²Vinnytsia National Technical University

The article reviews the common elements of prefabricated modular building metal structures with a list of their advantages and assessment of the prospects for the manufacture of their important components of the Lost Foam Casting (LFC) process. Such construction with the use of metal structures must have all the prerequisites to become an impetus and an effective solution in the construction industry, which will contribute to the reconstruction of the country. The fabrication of connector assemblies and bolt brackets for connecting beams and connectors with flexible steel plates for seismically unstable conditions is considered. A number of frame-cell thin-walled cast structures have been patented by the PTIMA Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine since 2011 on the basis of patterns made of expanded polystyrene, which are assembled mainly from repeating elements, and which is similar to the modern method of mounting prefabricated building metal structures. We have also gained experience in casting with LFC parts with cast threads, which simplifies the serial production of ball joints and conical tips for tubular elements. When constructing hangars and warehouses with shell vaults, reducing the weight of metal shells with the obligatory preservation of their required strength is an important requirement for the design of such structures. For this purpose, in particular, the method of inversion of flexible hanging nets formed from a flat state by gravity is used for building structures. The article uses the fact that the inverted chain line serves as an ideal outline for arches and domes, as homogeneous arches in the form of such a line undergo only compression deformation, but not bending. The method of physical modeling of the support surface of the momentless vault shell of a complex curved surface by the method of inversion of the sagging heated thermoplastic synthetic film was developed, which turned out to be simpler than the method of inversion of hanging nets.

Key words: modular constructions, building metal constructions, modeling, shell constructions, metal casting, metal savings, Lost Foam Casting.

Doroshenko Volodymyr – Dr. Tech. Sciences, Leading Research Fellow, Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, Institute of Physics and Technology of Metals and Alloys, National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv), e-mail: doro55v@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0070-5663.

Yanchenko Alexander – Ph.D., Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Vinnytsia National Technical University, e-mail: 1961yab@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3888-3772.