INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

ВЛИЯНИЕ НА КОНСТРУКЦИЯТА НА ЗАХРАНВАЩАТА СИСТЕМА ВЪРХУ КАЧЕСТВОТО НА СТОМАНЕНИ ПРЕЦИЗНИ ОТЛИВКИ

Красимир Киров

Технически университет – София
Инженерно-педагогически факултет Сливен, Бургаско шосе 59, България
**Красимир Киров: kirov_krasimir_1966@abv.bg*

INFLUENCE OF THE GATING SYSTEM DESIGN ON THE QUALITY OF PRECISION STEEL CASTINGS

Krasimir Kirov

Technical University – Sofia
Faculty of Engineering and Pedagogy – Sliven, 59 Burgasko Shose, Bulgaria
**Krasimir Kirov: kirov_krasimir_1966@abv.bg*

Abstract

This paper presents the results of an experimental study on the influence of the gating system design on the internal quality of a precision steel casting with complex geometry. The object of the study is a "Diaphragm" component produced from 40L steel via investment casting. Two gating configurations were analyzed: one with two peripherally located ingates and another with a single central ingate. To evaluate feeding efficiency, the study employed a modular approach for ingate design, alongside visual and radiographic inspection of the resulting castings. In the two-ingate configuration, the calculated ingate modulus was 3.6 mm, falling below the theoretically required value of 4.2 mm. Production trials revealed porosity in the thermal centers and the formation of shrinkage cavities, which could potentially break through to the surface during subsequent machining. The developed central-ingate configuration yielded a modulus of 9.4 mm. Radiographic inspection of the centrally fed castings showed no porosity in the critical zones. The results demonstrate that, for the given design, central feeding creates more favorable conditions for casting feeding and for limiting shrinkage porosity.

Keywords: investment casting; lost-wax casting; 40Л cast steel; feeding system; feeder; thermal node; shrinkage porosity; radiographic inspection.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Прецизното леене по стопяеми модели (investment casting) намира широко приложение при производството на стоманени отливки със сложна геометрия, тънки сечения и високи изисквания към размерната точност и качеството на повърхността. Предимство на процеса е възможността за получаване на детайли с минимални прибавки за механична обработка и сложни конструктивни елементи.

Качеството на стоманените отливки зависи не само от химичния състав на сплавта и параметрите на топене и леене, но и от конструкцията и разположението на леяковата система. При кристализацията на стоманата настъпва обемно свиване, което при недостатъчно подхранване може да доведе до образуване на рехавост, всмукнатини и порьозност [1]. За надеждно подхранване питателят трябва да кристализира след захранваната зона на отливката и да осигурява достатъчен

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

обем течен метал за компенсиране на свиването [1].

Особено значение има разположението на питателите спрямо термичните възли и зоните с по-голям модул на отливката, където кристализацията протича по-продължително и рискът от образуване на дефекти от свиване е повишен [2,3]. Методът на модулите е широко използван практически подход за определяне на необходимите размери на питателите и оценка на условията за подхранване [2,3].

При прецизното леене конструкцията на захранващата система е допълнително ограничена от геометрията на восъчния модел и керамичната форма. Поради това разположението и размерите на питателите трябва да бъдат съобразени едновременно с геометрията на отливката, последователността на кристализацията и възможностите за осигуряване на ефективно подхранване.

Рентгенографският контрол е необходим за установяване на вътрешни дефекти в стоманените отливки, като рехавост, порьозност и всмукнатини, които не могат да бъдат открити чрез визуален контрол.

Настоящото изследване разглежда влиянието на конструкцията и разположението на захранващата система върху качеството на стоманена прецизна отливка „Диафрагма“, изработена от стомана 40Л. Изследвани са два варианта на захранване – с два периферно разположени питателни канала и с един централен питател.

Целта на изследването е експериментално да се оцени влиянието на конструкцията и разположението на захранващата система върху образуването на дефекти от свиване при прецизното леене на стомана 40Л и да се оцени ефективността на изследваните конструктивни решения.

2. ОБЕКТ И МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

2.1. Конструктивни особености на изс-ледваната отливка

Изследваният детайл „Диафрагма“ има сложна пространствена геометрия, състояща се от цилиндрична част и радиално разположени ребра, което обуславя различни условия на охлаждане и кристализация.

Особено критични за подхранването са съединенията между ребрата и цилиндричната стена, представляващи термични възли. Поради конструктивните ограничения разположението и размерите на питателите трябва да бъдат съобразени както с изискванията за ефективно подхранване, така и с повърхнините за последваща механична обработка.

2.2 Изследване на различните захранващи системи

В настоящото изследване са разгледани два варианта на леякова система, осигуряващи различен начин на захранване на отливката. Целта е да се оцени влиянието на конструкцията на захранващата система върху условията на запълване на формовъчната кухина, протичането на процесите на кристализация и формирането на съпътстващи свиването дефекти.

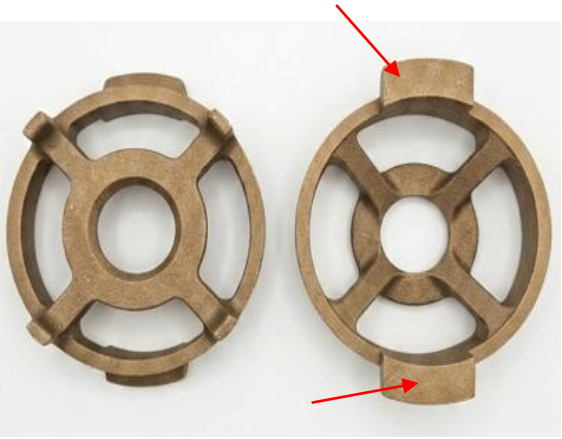
Вариант I – захранване с два питателя (виж фиг. 1 и фиг. 2):

При този вариант местата на присъединяване на ребрата към външния цилиндър представляват четири термични възела. Двата питателя са разположени между съседни термични възли. Изчисленият модул на отливката $R_{отл}$ е:

$$R_{отл} = 2{,}1 \text{ mm} \qquad (1)$$

За четирите термични възела е прието:

$$R_{отл} = 8{,}4 \text{ mm} \qquad (2)$$



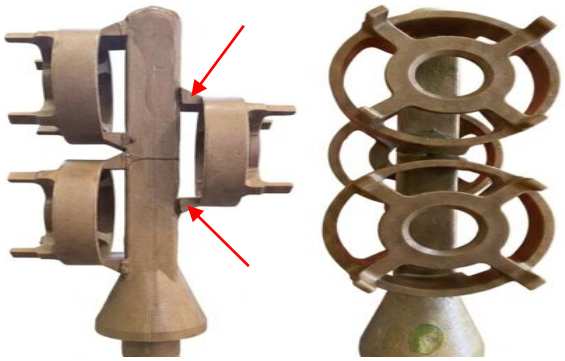
***Фиг. 1**. Стопяем модел на детайл „Диафрагма“с два питателя*

За леяка е избран диаметър $D_л$= 40 mm, при което модулът на сечението е:

$$R_л = 10 \text{ mm}.$$

За питателя е изчислен модул:

$$R_п = 3{,}6 \text{ mm}.$$



***Фиг. 2**. Моделен блок със захранване чрез два питателни канала*

Получената стойност е по-малка от теоретично необходимата минимална стойност 4,2 mm. Поради конструктивните ограничения това е максималният размер на питателя, който може да бъде разположен между двата термични възела. Вследствие на това се очаква образуване на локални всмукнатини в областта на термичните възли.

При производствените изпитвания е установено, че действителната рехавост значително надвишава предварително очакваната. Особено внимание заслужава наличието на всмукнатини, които след механична обработка могат да излязат на повърхността в областта на закръгленията между стените и ребрата.

Вариант II – централно захранване на отливката.



***Фиг. 3**. Стопяем модел на детайл „Диафрагма“с централен питател*

При втория технологичен вариант е използван един централен питател. Той е разположен в зоната на централния отвор на детайла. При този вариант конструкцията на отливката позволява използването на по-голям питателен модул. Изчисленият модул на централния питател е:

$$R_п = 9{,}4 \text{ mm}.$$

Следователно: $R_п > R_{отл}$.

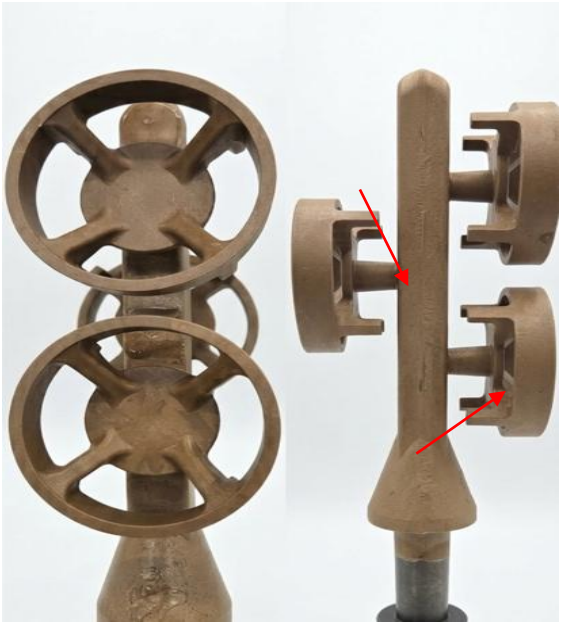
Това съотношение създава условия за по-продължително запазване на течна метална зона в питателя и за по-ефективно компенсиране на обемното свиване по време на кристализацията.

Същевременно обаче не трябва да се пренебрегва, че централното захранване увеличава количеството метал, което трябва да бъде отстранено при последващата механична обработка.

2.3. Материали и технологични параметри

За получаване на отливките е из-

ползвана стомана 40Л. Общите технически изисквания към стоманените отливки са съобразени с ISO 4990:2023, а специфичните изисквания за отливки, получени чрез прецизно леене по стопяем модел, са съобразени с ISO 16468:2025. Химичният състав на стоманата е контролиран по време на производствения процес.



***Фиг. 4**. Моделен блок със захранване чрез централен питателен канал*

Контролът е извършен с помощта на оптичен емисионен спектрометър (Foundry-Master Optimum, HITACHI) като концентрацията на легиращите елементи е дадена в масови проценти и е измерена с разделителна способност от 0,001%. Получените резултати са сравнени с изискванията към химическия състав на изследваната стомана (виж табл.1).

Топенето е извършено в индукционна пещ с вместимост 140 kg. След стопяване на шихтата металът е доведен до температура 1600–1620 °C, след което са въведени феросплавите и алуминият в определена технологична последователност.

Таблица 1. *Изискван и измерен химичен състав на изследваната стомана*

Елемент	Изисквано съдържание, %	Измерено съдържание, %
C	0,37–0,45	0,40–0,43
Mn	0,40–0,90	0,50–0,66
Si	0,20–0,52	0,29–0,32
S	≤ 0,04	0,02
P	≤ 0,04	0,018–0,020

Преди разливане течният метал е с температура 1640 °C. След въвеждане на алуминия стопилката е задържана 2–3 min при тази температура, след което е извършено почистване на „металното огледало“ и незабавно разливане в черупковите форми (керамичните черупкови форми са изваждат от пещта за прокаляване 3–5 min преди разливането и се продухват със сгъстен въздух). Стоманата е разливана от леярска кофа (чайников тип), предварително прокалена и подгрята до 800–850 °C. Разливането е извършено с непрекъсната метална струя от височина не по-голяма от 150 mm.

За производството на стопяемите модели е използвана шприц машина MHW6-4 като температурата на моделната смес в долния резервоар е поддържана в границите 47–52 °C, а температурата на инжекционния блок и дюзата – около 47–50 °C.

2.3.1. Оборудване и параметри на радиографичния контрол

Рентгенографският контрол на стоманените отливки е проведен с промишлен рентгенов генератор Teledyne ICM SITE-X CP200D. За режима на изследване е използвано напрежение на рентгеновата тръба 150 kV, ток 3 mA и време на експозиция 60 s. Рентгенографските изображения се регистрирани върху промишлен рентгенографски филм (клас на филма C5).

2.3.2. Оборудване и стандарти за механичните изпитвания

Механичните изпитвания на опън са проведени на универсална изпитвателна машина ZD-20, оборудвана с механична силова система с максимална изпитвателна сила 200 kN. Изпитването на опън е проведено съгласно ISO 6892-1:2019 при стайна температура, а изпитването на ударна жилавост – съгласно ISO 148-1:2016 на махален чук на Шарпи JB-300B с максимална ударна енергия 300 J и скорост на махалото 5,2 m/s. Използвани са стандартни образци с размери 10 × 10 × 55 mm, с V-образен надрез. Междуопорният размер на изпитвателното устройство е 40 mm.

2.4. Резултати и обсъждане

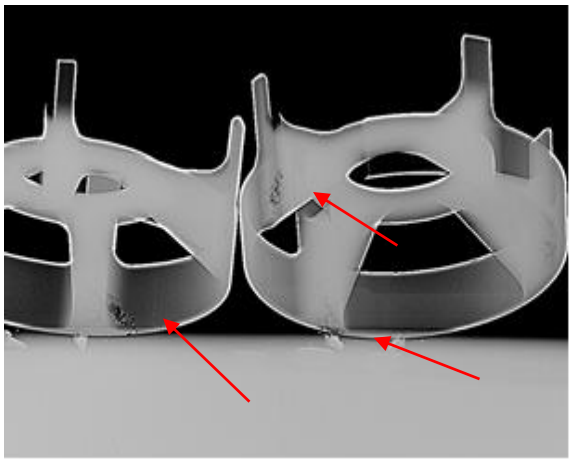
2.4.1. Поведение на отливката при захранване с два питателя

При първия технологичен вариант захранването на отливката се осъществява чрез два питателя, разположени между термичните възли.

Основният проблем на този вариант е свързан с недостатъчния питателен модул. Макар изчисленията да показват възможност за локализиране на всмукнатините в центъра на термичните възли, при реалния производствен процес е установена по-голяма от очакваната рехавост(около 70%).

Този резултат може да бъде свързан с характера при кристализацията на отливката. В областта на съединяване на ребрата с цилиндричната стена се натрупва по-голямо количество метал, което се охлажда по-бавно. При завършването на кристализационния процес се проявява обемно свиване, което изисква продължително подаване на течен метал.

При недостатъчен питателен модул течната метална зона в питателя се изчерпва преди приключване на кристализацията на термичния възел. В резултат на това се формират вътрешна рехавост и локални всмукнатини (фиг. 5).



Фиг. 5*. Рехавост на детайл „Диафрагма“ с два питателя след рентгенов контрол*

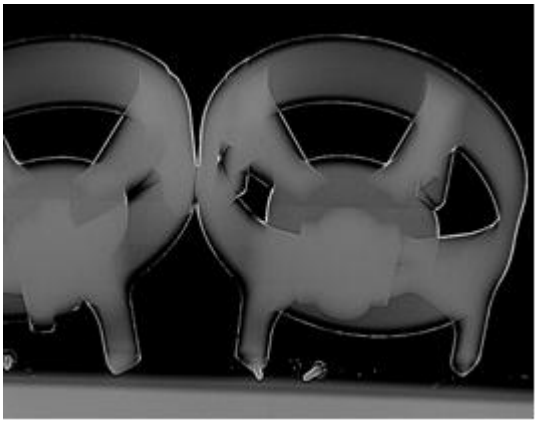
Особено неблагоприятно е, че при последващата механична обработка част от тези дефекти се отварят към повърхността. При проведените изследвания е установено, че всмукнатините получават външен излаз в областта на закръгленията при съединяването на стената с ребрата на детайла.

2.4.2. Поведение на отливката при централно захранване

При използването на един централен питател се изменя принципът на захранване на отливката. Увеличеният модул на питателя осигурява по-благоприятни условия за компенсиране на свиването.

Основният резултат от технологичните изпитвания е липсата на наблюдаваните при варианта с два питателя всмукнатини в термичните възли.

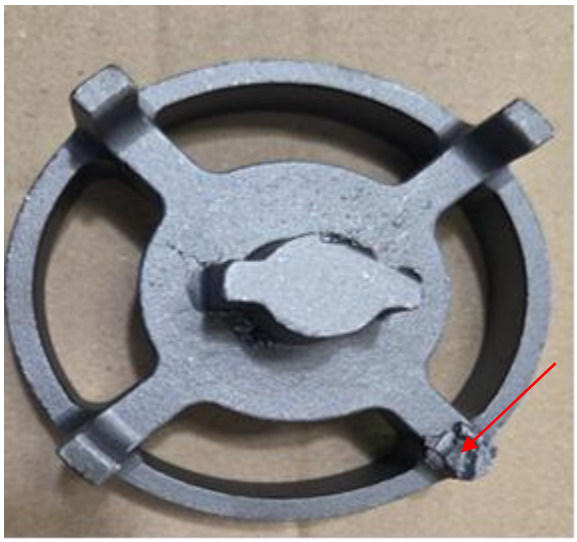
Това се потвърждава и от рентгенографския контрол. При отливките с два питателя е наблюдавана рехавост в областта на термичните възли, докато отливките с централен питател са характеризирани като плътни при проведеното рентгенографско изследване.



***Фиг. 6**. Бездефектна отливка на детайла „Диафрагма“ след рентгенографски контрол при използване на централен питател*

Полученият резултат показва, че за конкретната геометрия на детайла централното захранване осигурява по-благоприятни условия за кристализация и подхранване (фиг. 6).

Трябва обаче да се отбележи, че централният питател не отстранява всички възможни производствени дефекти (виж фиг. 7 и фиг. 8).



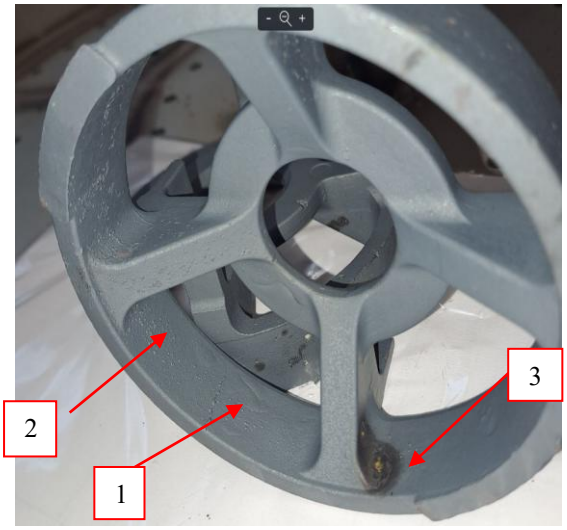
***Фиг. 7.** Дефект от счупена черупка*

При този вариант основните наблюдавани дефекти са свързани със счупване на керамичната черупка и попадане на пясък или други частици от формовъчния материал в отливката.

2.4.3. Резултати от визуалния контрол

При визуалния контрол са установени няколко основни групи дефекти:

- всмукнатини и рехавост в термичните възли;
- дефекти вследствие на счупване на керамичната черупка;
- газови и пясъчни шупли;
- счупени или деформирани крачета;
- дефекти при отделянето на отливката от леяковата система.



***Фиг. 8**. Видове дефекти, установени при отливката на детайла „Диафрагма“: 1 - нарастък, вследствие от счупена черупка;2 - пръски; 3 - всмукнатина*

При варианта с два питателя основният вид брак е свързан с всмукнатини в термичните възли. При централното захранване този вид брак не е наблюдаван. За този вариант основните дефекти са свързани с нарушаване на целостта на черупката и попадане на кварцов пясък във формата.

На етап „технологична проба“ са получени 170 отливки, от които 17 са отчетени като леярски брак. Изчислявайки общия дял на брака, получаваме :

$$B = \frac{\text{Бр.брак.дет.}}{\text{Общ брой дет.}} x100 = \frac{17}{170} x100 = 10\%()$$

Експерименталните механични характеристики са дадени като конкретни измерени стойности за изследваната технологична проба. Не се използват диапазони, тъй като те не позволяват еднозначна оценка на получените свойства.



***Фиг. 9**. Шупли от попаднал кварцов пясък в черупковите форми*

2.4.4. Рентгенографски контрол

Рентгенографският контрол е използван за установяване на вътрешни дефекти, които не могат надеждно да бъдат установени чрез визуален контрол.

При отливките с два питателя рентгенографските изображения показват наличие на рехавост в областта на термичните възли (фиг. 5.)

При отливките с централен питател такава рехавост не е установена и отливките са характеризирани като плътни (фиг. 6).

Установено е, че значително по-големият модул на централния питател създава условия за запазване на течна фаза за по-продължителен период от време и по този начин намалява вероятността за формиране на дефекти от свиването.

2.5. Механични свойства на получената стомана

Качеството на произведените отливки е оценявано не само чрез контрол на дефектите, но и чрез механични изпитвания.

За оценяване на механичните свойства на стомана 40Л са използвани предварително зададените минимални критерии за якост на опън, относително удължение и ударна жилавост. Изпитването на опън е проведено съгласно ISO 6892-1:2019, а изпитването на ударна жилавост – съгласно ISO 148-1:2016.

Таблица 2. Минимални критерии и експериментално получени механични характеристики на стомана 40Л

Показател	Минимален критерий	Експериментална стойност
Якост на опън Rm, MPa	≥ 520	640, 700, 730
Относително удължение A5, %	≥ 14	16, 18, 20
Ударна жилавост KC, J/cm²	≥ 3	5,5, 6,3, 6,5

Резултатите в таблица 2 показват, че изследваната стомана удовлетворява поставените изисквания за механични свойства.

Следователно при разглежданата технологична задача основният проблем не е свързан с несъответствие в химичния състав или механичните характеристики на материала, а с локалното образуване на вътрешни леярски дефекти, обусловени от условията на кристализация и подхранването с течен метал.

2.6. Обсъждане на резултатите

Съпоставянето на двата технологични варианта показва, че разположението и размерите на питателите трябва да се определят съобразявайки се не само геометричните ограничения, но и последователността на кристализацията.

При захранване с два питателя модулът $R_п$=3,6mm е по-малък от теоретично необходимия 4,2mm, което не осигурява достатъчно надеждно подранване на отливката.

При централното захранване модулът на питателя $R_п$=9,4mm е по-голям от модула на отливката и осигурява по-благоприятни условия за подхранване и ограничаване на дефектите от свиване.

Недостатък на този вариант е увеличаването на количеството метал, подлежащо на последваща механична обработка. Следователно изборът на захранваща система представлява компромис между ефективността на подхранването, качеството на отливката и разходите за механична обработка.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на проведеното изследване могат да бъдат формулирани следните основни заключения:

1. Конструкцията и разположението на захранващата система оказват съществено влияние върху вътрешното качество на стоманената прецизна отливка „Диафрагма“.

2. При захранване с два питателя модулът $R_п$=3,6mm е по-малък от теоретично необходимия $R_п$=4,2mm, което води до недостатъчно подхранване и образуване на рехавост и всмукнатини в областта на термичните възли.

3. При централно захранване модулът на питателя $R_п$=9,4mm е по-голям от модула на отливката и осигурява по-благоприятни условия за подхранване. Установените дефекти при този вариант са свързани основно с нарушаване на керамичната черупка и попадане на пясъчни частици във формата.

4. Химичният състав и механичните характеристики на стомана 40Л отговарят на изискванията, поради което установената рехавост е свързана основно с условията на кристализация и ефективността на захранването.

5. За изследваната конструкция на отливката „Диафрагма“ централното захранване осигурява по-благоприятни условия за ограничаване на рехавостта в областта на термичните възли.

ЛИТЕРАТУРА

[1] M. Blair and T. L. Stevens, Steel Castings Handbook, 6th ed. Materials Park, OH, USA: ASM International, 1995, pp. 7-1–7-17, doi: 10.31399/asm.tb.sch6.t68200115.

[2] ASM International, “Riser Design,” in ASM Handbook, Vol. 15: Casting. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2008, doi: 10.31399/asm.hb.v15.a0009016.

[3] J. Campbell, Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. Oxford, U.K.: Elsevier, 2011

[4] ISO 4990:2023, Steel castings — General technical delivery requirements, International Organization for Standardization, 2023.

[5] ISO 16468:2025, Investment castings (steel, nickel alloys and cobalt alloys) — General technical requirements, International Organization for Standardization, 2025.

[6] ISO 6892-1:2019, Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature, International Organization for Standardization, 2019.

[7] ISO 148-1:2016, Metallic materials — Charpy pendulum impact test — Part 1: Test method, International Organization for Standardization, 2016.