

Ірі модульді тісті дөңзелектергі ЭҚБ-ға арналған кристаллизатор конструкциясын таңдау және негіздеу

¹*СМАИЛОВА Баглан Кабдуллаевна, докторант, аға оқытушы, baglansmailova@mail.ru,

¹БУЗАУОВА Тоты Мейрбековна, т.ф.к., доцент, toty_77@mail.ru,

¹БАРТЕНЕВ Игорь Анатольевич, т.ф.к., доцент, igor_svar@mail.ru,

²ШКАМАТ Елена, аға қызметкер, jelena.skamat@vilniustech.lt,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

²Гедиминас атындағы Вильнюс техникалық университеті, Саулетекио аллеясы, 11, Вильнюс, Литва,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Ірі модульді тозған тістерді электр қожбен балқытуға (ЭҚБ) арналған кристаллизатордың конструкциясын таңдау және негіздеу қарастырылды. Тоқтан тістің өлшемдерін ескере отырып, осы тістердің эвольвентті формасын ескеретін екі түрлі кристаллизатор конструкциясы жасалды. Кристаллизаторда жүріп жатқан процестерді модельдеу және талдау үшін заманауи бағдарламалық кешендер COMSOL Multiphysics және ANSYS қолданылды. COMSOL Multiphysics бағдарламасында кристаллизатордың екі құрылымын салыстыруға мүмкіндік беретін симуляция жүргізілді, мақсат – салқындату тиімділігі жоғары шешімді таңдау. Салыстырмалы талдаудың нәтижесінде ЭҚБ процессінде қажетті салқындату деңгейін қамтамасыз ететін кристаллизатор құрылымы таңдалды. Содан кейін ANSYS бағдарламасын пайдалана отырып, таңдалған конструкциядағы термиялық кернеулер есептелді, бұл оның беріктік сипаттамаларын және эксплуатациялық жағдайларға төзімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Осылайша, жұмыс кристаллизатор конструкциясын таңдау үшін теориялық және практикалық негіздерді қамтамасыз етеді, бұл балқыту процесінің тиімділігін және өнімдердің ұзақ мерзімділігін қамтамасыз етеді.

Кілт сөздер: ірі модульді тістер, электрқожбен балқыту, кристаллизатор, COMSOL Multiphysics, ANSYS.

Кіріспе. Кристаллизатор электрқожбен балқытудың анағұрлым жауапты түйіні болып табылады. Онда электрод металының балқыуы, балқытылған металдың мәжбүрлі салқындауы және кристалдануы, сондай-ақ тістің қалыптасуы жүреді [1]. Экскаватор шөміштерінің тістері және басқалары сияқты қатты тозған бөлшектерді қалпына келтіруге арналған темірқорам [2] конструкциялары белгілі. Бұл конструкциялар ішкі қуысы бар корпусан тұрады, оның пішіні қалпына келтірілетін бөлшектің пішініне сәйкес келеді. Корпус үш бөліктен тұрады, олардың әрқайсысында салқындатқыш қабықтар бар. Бұл темірқорамның кемшілігі корпусының құрамдас бөліктерінің тозған беттің пішінін қайталайтын ішкі бетінің болуы болып табылады, бұл тістердің үстінің қажетті тазалығын қамтамасыз етуге мүмкіндік бермейді. Қалпына келтірілетін бөлшектің піші-

нін қайталайтын ішкі қуыстан тұратын [3] кристаллизатордың конструкциясында қоспалауыш материалдардан жасалған ендірмелер орнатылған ойықтар және салқындатқыш қабықтар бар. Алайда, бұл конструкция эвольвенттік пішінді тісті балқыту мүмкіндігін қарастырмайды. Бөлшектерді қатты тозған электрқожбен балқыту арқылы қалпына келтіру әдістерінде [4] қалпына келтірілетін бөлшектер көлденең күйде орнатылады. Балқыту кезінде үлкен модульді тістердің көлденең орналасуы күрделі мәселе болып табылады, себебі ол тісті мәжбүрлеп қалыптастырудың күрделі жүйесін әзірлеуді талап етеді, бұл бөлшектерді электрқожбен балқыту арқылы қалпына келтіру процесінің күрделенуіне және қымбаттауына әкеледі.

Кристаллизатордың белгілі бір түрін таңдау көптеген факторларға, соның ішінде балқыту процесінде қолданылатын мате-

риалдарға, балқытылған бөлшектің сапасы мен өлшеміне қойылатын талаптарға және нақты пайдалану жағдайларына байланысты.

Әдеби және патенттік көздерді талдау негізінде келесі міндеттерді қамтамасыз етуі тиіс эвольвенттік пішіні тозған тістерді қалпына келтіру үшін кристаллизатор конструкциясын әзірлеу қажеттілігіне байланысты өзекті мәселе анықталды:

1. Тозған тістегеріштің жұмыс сызбасына сәйкес тістің өлшемдері мен геометриялық параметрлерін қалпына келтіруге кепілдік беру.

2. Сынау үшін ең аз әдіпті қамтамасыз ету.

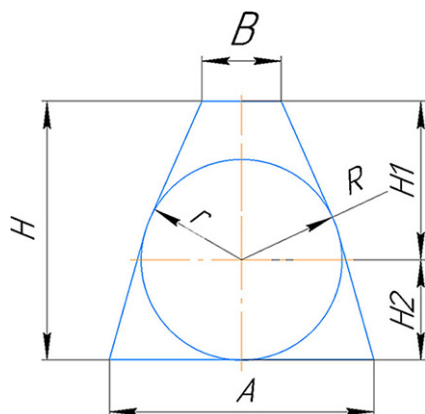
Кристаллизатордың габариттік өлшемдері балқытылатын бөлшектің көлеміне байланысты. Өлшеу құралдарын пайдалана отырып, модулі 20 мм тістерді өлшейміз және келесі өлшемдерді аламыз (1-сурет):

$B=0,66\text{m}$; $A=2,25\text{m}$; $H_1=1\text{m}$; $H_2=1,25\text{m}$; $r=0,9\text{m}$; $R=5,85\text{m}$.

$B=13,2\text{mm}$; $A=45\text{mm}$; $H_1=20\text{mm}$; $H_2=25\text{mm}$; $r=18\text{mm}$; $R=117\text{mm}$.

Негізгі қималардағы кристаллизатордың жұмыс қабырғаларының контурлары жұмыс сызбасына сәйкес тозған тістердің контурларын қайталайды, осылайша төзімділік артады, жылу режимін басқару жеңілдейді. Кристаллизатор қабырғаларының қалыңдығы конструкциялық беріктікті, қаттылықты, сондай-ақ тісті салқындату мен қатайтудың қажетті жағдайларын қамтамасыз етуі керек. Болаттан жасалған дайындамалар үшін кристаллизатор қабырғасының қалыңдығын оның иілуге қарсы ең үлкен төзімділігін қамтамасыз ету шарты бойынша белгілейміз. Мазмұндалғандар негізінде кристаллизатор қабырғасының қалыңдығын 7 мм етіп таңдаймыз [4].

Балқытылған металдың қалыптасу процесі, сызықтық өлшемдердің өзгеруі анағұрлым күрделі жүреді [4], кристаллизатордың



1-сурет – Тістің есептік параметрлері

пішіні мен өлшемдерінің өзгеруін, сондай-ақ балқытылған металдың сызықтық шөгуін ескеру қажет. Тістің есептік параметрлерін және металдың шөгуін ескере отырып, келесі өлшемдерді аламыз: $B=14,6\text{mm}$; $A=47\text{mm}$; $H=48,2\text{mm}$.

Электрқожбен балқыту кристаллизаторы балқыту камерасы ретінде болады. Кристаллизатордың ішінде температурасы $1900-2000^\circ\text{C}$ -ға жетуі мүмкін қатты қызған жоғары белсенді қож болады. Қож арқылы электр тогы өткен кезде онда бөлінетін жоғары жылу қуаты, сондай-ақ кристаллизаторы арқылы үлкен ток (ондаған мың амперге дейін) өту мүмкіндігі кристаллизатор жұмысының ауыр жылу жағдайларын тудырады [4]. Кристаллизатор қабырғасындағы жылу ағыны тығыздығының шамасы бетінің бір шаршы метріне шамамен сағатына миллион килокалорияға жетуі мүмкін. Сондықтан кристаллизатордың конструкциясына қойылатын негізгі талаптардың бірі жылудың сенімді бөлінуін қамтамасыз ету болып табылады.

Жоғарыда келтірілген есептік деректерді ескере отырып, тістегеріштердің ірі модульді тістерін электрқожбен балқыту үшін әртүрлі салқындату арналары бар кристаллизатордың екі конструкциясы әзірленді (2-сурет).

COMSOL Multiphysics қолданбалы бағдарламасын пайдаланып, жылудың таралуын зерттейміз.

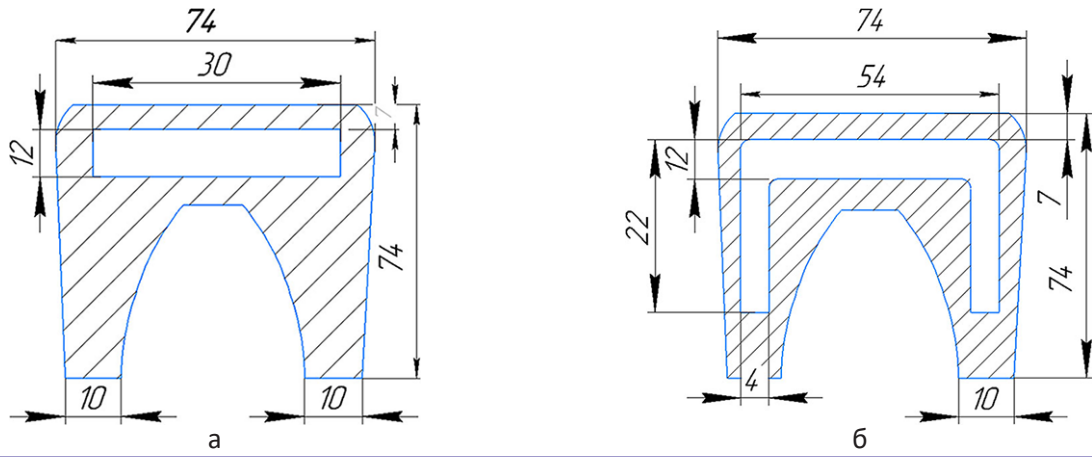
Зерттеу әдісі әдеби шолу және имитациялық модельдеу болып табылады.

Имитациялық модельдеу. Мақсаты – әртүрлі салқындату арналары бар тісті электрқожбен балқыту кезінде кристаллизатор моделін құру (3-сурет, а және б нұсқасы), бұл жылу процестерін біршама тереңірек түсінуге және кристаллизатордың салқындауын одан әрі талдауға мүмкіндік береді. COMSOL Multiphysics пакеті жеке дифференциалдық теңдеулермен сипатталатын барлық физикалық процестерді модельдеуге мүмкіндік береді.

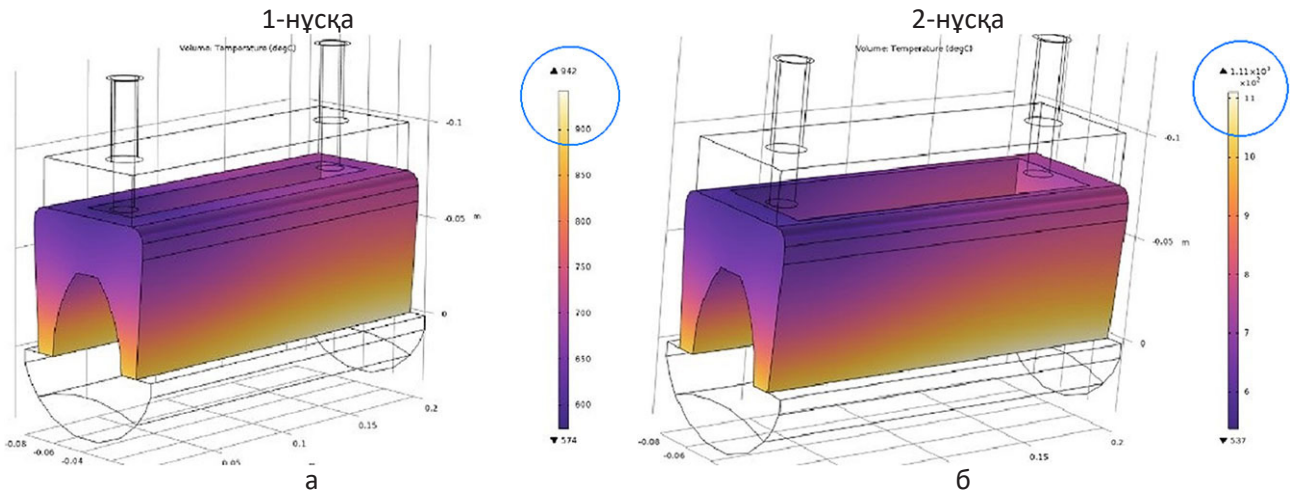
Модельдеуге арналған бастапқы деректер:

1. Кристаллизатор материалы – мыс;
2. Қож ваннасының температурасы – 1650°C .
3. Кіру кезінде салқындату үшін судың температурасы $+20^\circ\text{C}$.
4. Жұмыс беті бойында қалыңдығы шамамен 1,5 мм гарнисаждық қабықша болады.
5. Есептеу стационарлық емес.

Бастапқы конфигурация ретінде талдау үшін кристаллизатор моделі пайдаланылады және онда жылу эффектілерін, соның ішінде өткізгіштік температурасына тәуелді (Linearized resistivity материалының моделі арқылы) түрін есепке алуды жүзеге асы-



2-сурет – Кристаллизатордың көлденең қимасы (а, б)



3-сурет – Кристаллизатор қимасындағы температураның таралуы

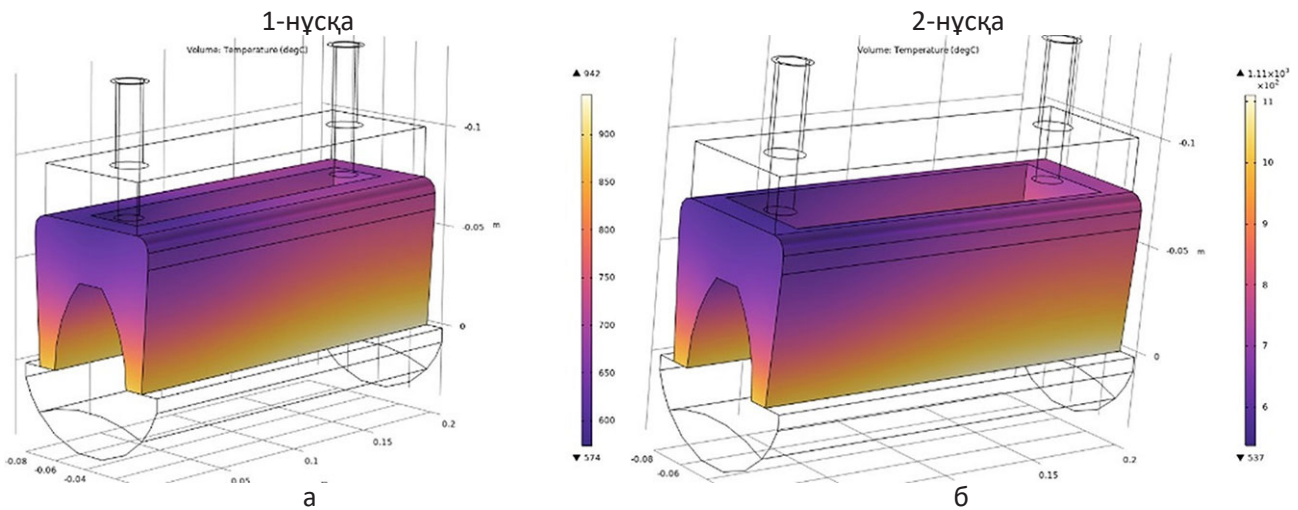
рады. Модельде температураның таралуы зерттеледі (3-сурет).

Нұсқада (3, а-сурет), 942°C температурасы екінші нұсқадағы 1110°C қарағанда айтарлықтай төмен (3, б-сурет). Бұл берілген конструкция жылуды тиімді шығаратынын білдіреді, бұл қатты қызып кетуді және кристаллизатордың ықтимал зақымдалуын болдырмау үшін маңызды. Сондай-ақ төмен температура тиімдірек салқындатуды көрсетеді. Бұл балқытылған материалдың сапасының жақсаруына және термиялық кернеулердің төмендеуіне әкелуі мүмкін, бұл өз кезегінде кристаллизатордың ұзақ мерзімділігін арттырады. Осылайша, берілген деректер негізінде жоғары жағында орналасқан салқындату арнасы бар конструкция біршама тиімді салқындату және кристаллизатордың жұмыс температурасын төмендету тұрғысынан артық болып табылады.

Модельдеудің екінші кезеңінде біз ма-

териалдардың жылу өткізгіштігін салыстырамыз. Ол үшін бірінші нұсқада кристаллизаторды – мыстан, ал екіншісінде сұр шойыннан 25 дайындаймыз (4-сурет).

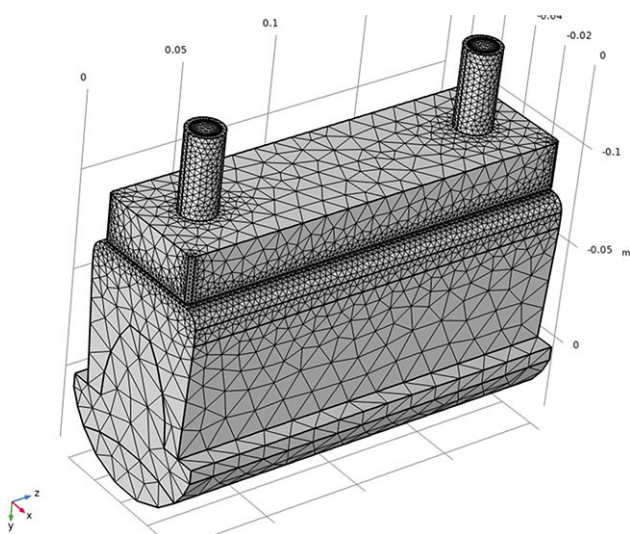
Ең жақсы нұсқа кристаллизатордың бірінші нұсқасы болып табылады. Өйткені, ол жылуды тиімді шығарады, бұл қатты қызып кетуді және кристаллизатордың ықтимал зақымдануын болдырмас үшін маңызды. Сондай-ақ төмен температура біршама тиімді салқындатуды көрсетеді. Кристаллизаторды қыздыру, салқындату, сондай-ақ жоғары немесе төмен температурада ұзақ уақыт болу кезінде оның жылу күйінің өзгеруіне байланысты туындайтын термиялық кернеулер конструкция төзімділігінің жоғалуына, салқындату қыздыру циклдары кезінде және дене температурасы күрт өзгерген кезде термоқажуынан бұзылуға әкелуі мүмкін. Осы мақсатта термиялық кернеулерге арналған кристаллизатордың әзірленген конструк-



4-сурет – Әртүрлі материалдардан жасалған кристаллизатор модельдері

циясын талдаймыз. Ол үшін алдымен шектік шартты анықтаймыз, материалдардың жылу-физикалық және физика-механикалық қасиеттерін белгілейміз. Ықтимал зақымдану қаупін анықтау үшін бұл кернеулердің материалдың беріктік шегіне қаншалықты жақын екенін бағалаймыз.

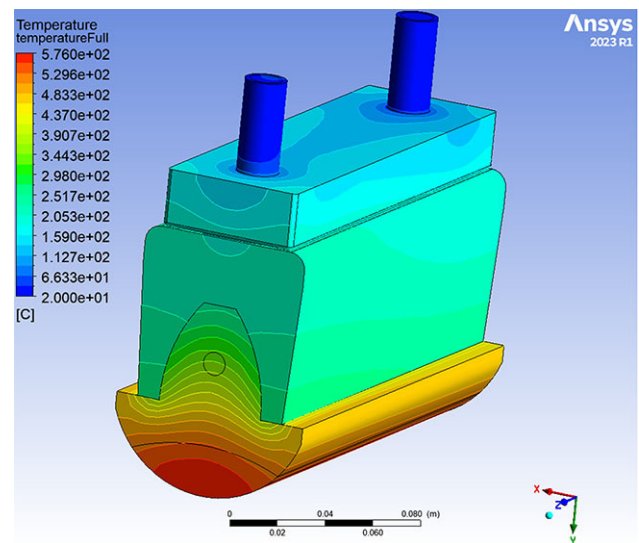
Кристаллизатор корпусының ішіндегі су ағынының ағысын сипаттау үшін турбуленттік ағындағы стандартты k-epsilon моделін таңдап, корпустың және кристаллизатор қақпағының жылулық кеңеюін есепке алу үшін жылу беру модульдері мен механика арасындағы байланысты қосамыз. Есептеу аймағының соңғы-элементтік моделін аламыз (5-сурет).



5-сурет – Есептеу аймағының соңғы-элементтік моделі

Осы нұсқа үшін ANSYS бағдарламалық кешенінде ANSYS Mechanical пакетін пайдалану арқылы термиялық кернеуді есептейміз. Салқындатқыш сұйықтық (су) ағынының және жылу берілісінің түйіндес моделі ANSYS Fluent пакетінде есептелді [5]. Сипатталған модельде есептелген салқындату процесінің физикалық уақыты 3 минутты құрайды. Бастапқы уақыт моментінде есептік аймақтың жылу өрісінің эпюрасы 6-суретте көрсетілген.

Нәтижелер мен талқылаулар. Максимум кернеу мәндері кристаллизатордың болат қақпағы мен мыс корпусы үшін сәйкесінше 205 және 317 МПа құрайды. Қарастырылып отырған уақыт аралығында крис-



6-сурет – 180 с уақыт моментіндегі есептік аймақтың жылу өрісінің эпюрасы

таллизатордағы механикалық кернеулердің шамасы 180 с (3 мин.) мыс үшін 205 МПа аққыштық шегінен аспайды, бірақ 340 МПа беріктік шегінен аз. Максимум кернеулердің

шоғырлану орны негізінен кристаллизатордың аяқтарында болады, өйткені тістегеріш тісін салқындату процесінде максимум температура байқалады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., Рябцев И.А., Сарычев И.С. Электрошлаковая наплавка. Москва: Наука и технологии, 2011.
2. RU, 2272703 C2, МПК В23Р 6/00, В 23К 25/00, В22D 19/06 (RU, 2604165 C2, МПК В23Р 6/00 (2006.01), В 23К 25/00 (2006.01), В22D 19/10 (2006.01)).
3. RU, 134461 U1, МПК В22 D 19/10 (2006.01) Кристаллизатор. Патент на изобретения.
4. Патент РФ, 2139175, кл. В23К 25/00, С22В 9/193. Приоритет от 14.07.1998, опуб.10.10.1999, бюллетень № 28.
5. <https://www.myvin.com.ua/news/13020-stal-45-osobennosty-prymeneniya-y-kharakterystyka>

Выбор и обоснование конструкции кристаллизатора для ЭШН крупномодульных зубчатых колес

¹*СМАИЛОВА Баглан Кабдуллаевна, докторант, старший преподаватель, baglansmailova@mail.ru,

¹БУЗАУОВА Тоты Мейрбековна, к.т.н., доцент, toty_77@mail.ru,

¹БАРТЕНЕВ Игорь Анатольевич, к.т.н., доцент, igor_svar@mail.ru,

²ШКАМАТ Елена, старший сотрудник, jelena.skamat@vilniustech.lt,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

²Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, аллея Саулетекио, 11, Вильнюс, Литва,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Проведен анализ выбора конструкции кристаллизатора для электрошлаковой наплавки (ЭШН) крупномодульных изношенных зубьев. Исходя из размеров изношенного зуба, разработаны две различные конструкции кристаллизатора, которые учитывают эвольвентную форму зуба. Для моделирования и анализа были использованы программные комплексы COMSOL Multiphysics и ANSYS. В COMSOL Multiphysics выполнена симуляция, позволяющая сопоставить две конструкции кристаллизатора, с целью выбора наиболее эффективного по охлаждению решения. В результате сравнительного анализа выбрана конструкция кристаллизатора, которая обеспечивает необходимый уровень охлаждения в процессе ЭШН. Затем, с использованием ANSYS, рассчитаны термические напряжения в выбранной конструкции, что позволяет оценить её прочностные характеристики и устойчивость к условиям эксплуатации. Таким образом, работа предоставляет теоретическое и практическое обоснование выбора конструкции кристаллизатора, обеспечивающего эффективный процесс наплавки и долговечность изделий.

Ключевые слова: крупномодульные шестерни, электрошлаковая наплавка, кристаллизатор, COMSOL Multiphysics, ANSYS.

Selection and Justification of the Mold Design for the ESH of Large-Module Gears

¹***SMAILOVA Baglan**, Doctoral Student, Senior Lecturer, baglansmailova@mail.ru,

¹**BUZAUOVA Toty**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, toty_77@mail.ru,

¹**BARTENEV Igor**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, igor_svar@mail.ru,

²**SHKAMAT Jelena**, Senior Fellow, jelena.skamat@vilniustech.lt,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

²Vilnius Gediminas Technical University, Sauletekio Alley, 11, Vilnius, Lithuania,

*corresponding author.

Abstract. This article analyzes the choice of a mold design for electroslag surfacing (ESN) of large-modulus worn teeth. Based on the size of the worn tooth, two different mold designs have been developed that take into account the involute shape of the tooth. COMSOL Multiphysics and ANSYS software packages were used for modeling and analysis. In COMSOL Multiphysics, a simulation was performed that allows us to compare two crystallizer designs in order to select the most efficient cooling solution. As a result of the comparative analysis, the mold design was selected, which provides the necessary level of cooling during the ESH process. Then, using ANSYS, thermal stresses in the selected structure were calculated, which makes it possible to evaluate its strength characteristics and resistance to operating conditions. Thus, the work provides a theoretical and practical justification for choosing a mold design that provides.

Keywords: large-module gears, electroslag surfacing, crystallizer, COMSOL Multiphysics, ANSYS.

REFERENCES

1. IU.M. Kuskov, V.N. Skorokhodov, I.A. Riabtsev, I.S. Sarychev. Elektroshlakovaya naplavka. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2011.
2. RU, 2272703 C2, MPK B23P 6/00, B 23K 25/00, B22D 19/06 (RU, 2604165 C2, MPK B23P 6/00 (2006.01), B 23K 25/00 (2006.01), B22D 19/10 (2006.01)).
3. RU, 134461 U1, MPK B22 D 19/10 (2006.01) Kristallizator. Patent na izobreneniia.
4. Patent RF, 2139175, kl. V23K 25/00, S22V 9/193. Prioritet ot 14.07.1998, opub.10.10.1999, biulleten' no. 28.
5. <https://www.myvin.com.ua/news/13020-stal-45-osobennosty-prymeneniya-y-kharakterystyka>