

# Реологічні характеристики сталі при безперервній валковій розливці-прокатуванні

О.В. Ноговіцин<sup>1,2</sup> • О.В. Холявік<sup>1</sup> • О.О. Кравчук<sup>1</sup> • О.В. Самойленко<sup>1</sup> • Р.С. Борис<sup>1</sup>

Received: 30 October 2021 / Accepted: 24 November 2021

**Проблематика.** У процесі отримання смуги в ливарно-прокатному пристрої постає питання поєднання процесу гарячої прокатки затверділого матеріалу та процесу кристалізації рідкого розплаву. Це дає змогу реалізувати ефективну технологію отримання тонколистового прокату.

**Мета дослідження.** Визначення раціональних параметрів для виконання математичного моделювання поведінки матеріалу при валковій розливці потребує чітко прописаних рекомендацій. Матеріал для процесу прокатування – сталь. Вихідний матеріал застосовувався у твердому, рідко-твердому та рідкому станах.

**Методика реалізації.** Аналіз властивостей сталі було проведено на основі результатів експериментів, що отримані в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України. Для аналізу реологічних властивостей сталі використовувалися залежності межі текучості для легованих та вуглецевих сталей в певному інтервалі температур. Обраний інтервал температур включає солідус та рідко-твердий стан сталі, що розташований вище 0,8 Тпл.

**Результати дослідження.** За результатами досліджень виконано аналіз реологічних властивостей сталі у твердому, рідко-твердому та рідкому станах під час безперервної розливки-прокатування на валках. Використання отриманих залежностей дозволяє виконувати математичне моделювання деформації та гідродинаміки матеріалу при безперервній розливці-прокатуванні сталевих смуг із застосування валкових ливарно-прокатних пристроїв.

**Висновки.** Побудовані залежності у сукупності з дослідженнями в'язкості сталі у рідкому стані та опором деформації сталі у твердому стані найбільш повно описують реологічні властивості сталей при ливарно-деформаційних процесах. Отримані залежності дозволяють реалізувати надефективну технологію отримання тонколистового прокату.

**Ключові слова:** безперервне прокатування, валкова розливка, реологічні характеристики, межа текучості, інтервал температур, солідус, ліквідус, опір деформації.

## Вступ

Технологія прокатного виробництва на теперішній час, як в Україні, так і за її межами, досягла суттєвих позитивних результатів зі збільшення продуктивності прокатних станів, покращення якості продукції

та зменшення її собівартості. Це стало можливим завдяки освоєнню ливарно-прокатних модулів. В порівнянні з виробами, що отримані на прокатних станах, використання ливарно-прокатних агрегатів забезпечує: економію металу, збільшення продуктивності роботи машин, зменшення виробничих площин, скорочення чисельності працюючих, покращення якості виробів за рахунок отримання більш однорідної структури сталі, можливість автоматизації та механізації, зменшення терміну окупності при впровадженні нових підприємств та зменшення витрат енергії на виготовлення виробів. Особливо помітні результати дає впровадження безперервної валкової розливки металу у валки-кристалізатори, яка на теперішній час досягла суттєвих позитивних результатів. Тому удосконалення процесу валкової розливки рідкого металу для виготовлення смуг та валкових ливарно-прокатних машин

✉ О.В. Холявік  
k\_omd@ukr.net

<sup>1</sup> КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна;

<sup>2</sup> Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

для здійснення цього способу виробництва штаби є задачею актуальною, вирішення якої дозволить збільшити продуктивність праці та зменшити витрати енергії і собівартість виробництва.

Процес отримання смуги в валковому ливарно-прокатному агрегаті є досить своєрідним. Суміщення одночасно двох процесів: кристалізації рідкого розплаву і гарячої прокатки затверділого металу в одну операцію, дало можливість отримати одну з найбільш ефективних технологій для отримання тонкого листового прокату, що дозволило знизити капіталовкладення та експлуатаційні витрати.

Підвищення вимог до продуктивності прокатних станів та покращення якості виробів привело до розвитку нових технологічних процесів, які відображують в собі суміщення процесів лиття та прокатування [1, 2, 3].

Безперервна розливка сталі в з'єднанні з прокатуванням сприяє економії капіталовкладень у зв'язку з виключенням витрат на парк виливниць, забезпечує економію енергії, яка витрачається на підігрів зливків у нагрівальному колодязі, дозволяє знизити екологічне навантаження на атмосферу, підвищити якість металопродукції, поліпшити умови роботи обслуговуючого персоналу. Такий процес дозволяє скоротити цикл отримання готової продукції від декількох діб до декількох годин, зменшити масу обладнання приблизно в 1,5 разів, скоротити чисельність працівників на 30 %, збільшити продуктивність процесу на 25 %.

При вході валків в ванну рідкого металу охолоджувальний інструмент контактує з розплавом, перегрітим вище температури ліквідусу ( $T_L$ ). При досягненні розплавом температури солідусу ( $T_S$ ) на поверхні валка утворюється суцільна кірка затверділого металу. До точки зімкнення твердих кірок між ізолініями температур ліквідусу і солідусу метал перебуває в напіврідкому стані. Нижче точки зімкнення твердих кірок відбувається деформація твердого металу.

Для математичного моделювання поведінки металу при валковому розливанні необхідно обрати реологічні моделі для гарячого металу в рідкому, рідко-твердому та твердому станах.

При моделюванні течії рідкого металу ми маємо справу з в'язким середовищем, в якому напруження зсуву  $\tau$  залежить від швидкості зсуву  $\dot{\gamma}$ , а константою пропорційності є коефіцієнт динамічної в'язкості  $\eta$ :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}. \quad (1)$$

Дослідженню в'язкості рідких металів присвячено досить багато робіт, проаналізованих в праці [4]. Помічена обернена залежність динамічної в'язкості від температури розплаву. Наприклад, для заліза наведена формула:

$$\ln \eta = 11.429 - 45.51 \cdot \frac{103}{T} + 48.96 \cdot \frac{106}{T_2}, \quad (2)$$

де  $\eta \cdot 10^2$  г/(см·с);  $T$  – температура в К.

Кінематична в'язкість легованих сталей в інтервалі температур 1470–1580 °С відповідно до [5] знижується від  $6,0\text{--}8,3 \cdot 10^{-7}$  до  $5,2\text{--}6,6 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. При густині рідкої сталі 7200 кг/м<sup>3</sup> динамічна в'язкість рідких сталей буде змінюватись в діапазоні від 0,0043–0,006 до 0,0037–0,0048 кг/(м·с).

При моделюванні процесів гарячої деформації опір деформації визначають при випробуванні зразків на розтяг або стиск при параметрах, що відповідають реальним процесам обробки тиском. Аналіз методів визначення опору деформації представлено в роботі [6]. Широкі дослідження опору деформації сталей проведені під керівництвом Л.В. Андреюка [7]. Для визначення опору деформації запропонована залежність:

$$\sigma_T = S \sigma_{00} \dot{\epsilon}^a (10\epsilon)^b \left( \frac{T}{1000} \right)^c; \quad (3)$$

де:  $S$ ,  $\sigma_{00}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – числа, що визначаються для кожної марки сталі відповідно до її хімічного складу.

Параметри досліджень опору деформації для побудови залежності (3) знаходились в діапазоні:  $\dot{\epsilon} = 0,01\text{--}150$  с<sup>-1</sup>;  $\epsilon = 0,05\text{--}0,3$ ;  $T = 800\text{--}1300$  °С.

Дані про властивості сталі при температурах близьких до температури солідусу і вище (в двофазній рідко-твердій зоні) наводяться лише в окремих роботах [8, 9, 10, 11].

В Фізико-технологічному інституті металів і сплавів НАН України були виконані дослідження механічних властивостей характерних представників низьковуглецевих (Армко), вуглецевих (45), низьколегованих (09Г2С), середньолегованих (22Х3М, 12ХН3А) і високолегованих (08Х18Н10Т) сталей при температурах від 1000 до 1500 °С. Дослідження виконані на установці ИМАШ20-78. Для визначення температур ліквідусу і солідусу кожної досліджуваної сталі використаний метод диференціального термічного аналізу на дериватографі Q1500D. Механічні властивості ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) визначали при випробуваннях на розрив зразків квадратного перерізу 5×5 мм. Швидкість деформації ( $\dot{\epsilon}$ ) складала  $4 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>. Нагрів зразків проводився за допомогою пластинчастого молібденового нагрівача, на якому розміщувався зразок досліджуваної сталі. Отримані дані були представлені в роботі [12, 13, 14, 15] в табличному вигляді, а для деяких сталей – і в графічному. Хімічний склад сталей наведено в таблиці 1.

В цьому перетворенні границя текучості різко знижується. При подальшому підвищенні температури до температури солідусу (1515 °С) зниження границі текучості сповільнюється, а при температурах вище солідусу границя текучості різко падає, що пов'язано зі утворенням рідкої фази в досліджуваній сталі.

Однак ці дані не були математично оброблені як для твердого, так і для твердо-рідкого стану металу, що не дозволяє їх використовувати при математичному моделюванні валкового розливання та інших процесів



наведених в роботі [4], при значеннях параметрів деформації  $\dot{\epsilon} = 0,04 \text{ c}^{-1}$ ;  $\epsilon = 0,002$  (умови випробування зразків на установці ИМАШ20-78) показали, що має місце певний збіг результатів для сталей, що мають відносно невисокі значення опору деформації. Проте для високолегованих сталей формула (3) надавала підвищені значення, наприклад, для сталі X18H10T вона перевищувала експериментальні в два рази. Ця невідповідність пояснюється тим, що мінімальна ступінь деформації для обробки результатів експерименту на пластометрі в роботі [4] була рівна 5 %, тоді, як при випробуваннях на розтяг границя текучості визначалася при ступені пластичної деформації 0,02 %. Екстраполяція формули (3) в діапазоні малих деформацій (< 5%) може призводити до великих похибок для сталей, що мають високий вміст легуючих елементів.

На Рис. 4 наведені розрахункові криві  $\sigma(\epsilon)$  (суцільні лінії) в інтервалі деформації 0,02–10 % при температурі 1200 °C для сталей 09Г2С та X18Н10Т. Відрізки кривих в діапазоні деформацій 0,02–5 % (пунктирні лінії) з'єднують експериментальні значення границі текучості при випробуваннях на розтяг з розрахунковим значенням опору деформації при  $\epsilon = 5 \%$ . З наведеного слідує, що формула (3) не призначена для розрахунку границі текучості при статичних випробуваннях високолегованих сталей.

Для знаходження формули для розрахунку границі текучості для умов статичних випробувань були оброблені експериментальні дані<sup>1</sup>, наведені в роботі [6]. Отримана наступна залежність:

$$\begin{aligned} \sigma_T = & 94.43 - 0.0627T - 4.4C - 44.5Si3Mn3 - \\ & -13.2Si3Mn2 + 27Si3Mn + 2.9Si3 + 9.5Si2Mn3 - \\ & -0.6Si2Mn2 - 5.8Si2Mn + 0.6Si2 + 30.2SiMn3 + \\ & +0.9SiMn2 - 18.3SiMn + 1.4Si + 3.2Mn3 + 0.1Mn2 - \\ & -1.9Mn - 10.5Ni2 + 7.9Ni, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $T$  – температура, °C;

$C, Si, Mn, Ni$  – вміст в сталі вуглецю, кремнію, марганцю, нікелю, %.

Межа текучості при температурі вище  $T_S$  починає різко спадати, і формули (3) і (4) перестають працювати. Зокрема, в роботі [26] для сталі 45 встановлено, що показник  $a$  в формулі (3) для розрахунку опору деформації при температурах, які перевищують  $T_S$ , починає швидко зростати (Рис. 5), що трактується авторами роботи [5] підвищенням в'язких властивостей сталі в зв'язку з появою в сталі рідкої фази.

*a*

*b*

**Рис. 4.** Зміна границі текучості сталі 09Г2С (*a*) і сталі X18Н10ТЛ (*b*) від ступеня деформації при температурі 1200 °C і швидкості деформації  $\dot{\epsilon} = 0,04 \text{ c}^{-1}$ . Суцільна лінія – по формулі (3), пунктирна – по експериментальним даним

**Рис. 5.** Залежність показника  $a$  в формулі (3) від температури Сталі 45

<sup>1</sup> Обробка виконана за участю Дядюри А.С.

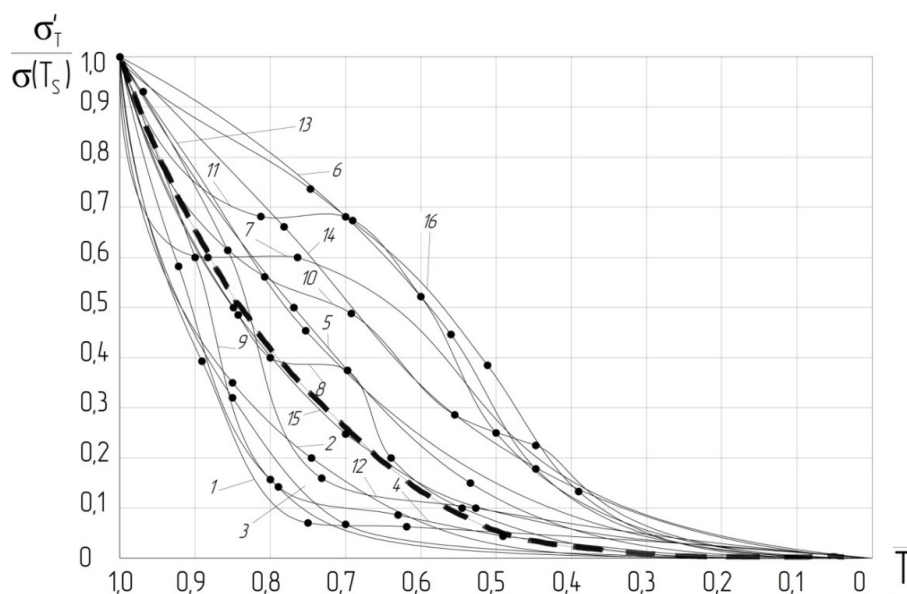


Рис. 6. Залежність значення  $\frac{\sigma'_T}{\sigma(T_s)}$  від температури  $\bar{T}$ . •—• - експеримент [6], номери біля кривих відповідають номеру сталі в таблиці; --- - розрахунок по формулі (5).

Для побудови залежності границі текучості сталі в інтервалі температур  $T_s \leq T \leq T_L \cdot (\sigma'_T)$  використовували безрозмірну змінну  $\bar{T} = \frac{T_L - T}{T_L - T_s}$  яка у вказаному інтервалі температур приймає значення від 1 до 0. За відомою гіпотезою [29] значення  $\bar{T}$  відповідає частці твердої фази в сталі при температурі  $T$ . Аналіз експериментальних даних (Рис. 6) показав, що в якості залежності границі текучості від  $\bar{T}$  можна застосувати степеневу функцію:

$$\sigma_T = \sigma(T_s) \cdot \bar{T}^n, \quad (5)$$

де  $\sigma(T_s)$  – опір деформації при температурі солідусу  $T_s$ . Статистична обробка експериментальних даних для 16 марок сталей показала, що при  $n = 4$  абсолютна похибка формули (5) складає 1,09 Н/мм<sup>2</sup>.

## References

- [1] V.N. Danchenko, “Progressive metal forming processes”, *Metallurgical and mining industry*, No. 7, pp. 1–8, 2011.
- [2] A.A. Minaev, *Combined metallurgical processes*, Donetsk: Technopark Don GTU UNITECH, 2008.
- [3] V.M. Danchenko, V.O. Grinkevich and O.M. Golovko, *Theory of metal pressure processing*, Dnepropetrovsk: Thresholds, 2008.
- [4] E.E. Shpilrain *et al.*, Investigation of the viscosity of liquid metals, Moscow: Science, 1983.
- [5] O.A. Chikova, “Influence of defects on the viscosity of liquid steels 9Kh2MF and 75Kh3MF”, *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, No. 9, pp. 53–56, 2013. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-9-53-56>
- [6] Yu.V. Kononov *et al.*, *Calculation of sheet rolling parameters*, Moscow: Metallurgy, 1986.
- [7] L.V. Andreyuk *et al.*, *Stal*, No. 6, pp. 522–523, 1972.

## Висновки

Отримані результати досліджень свідчать про те, що зміни таких реологічних властивостей сталей, як границя текучості, пов'язані при підвищенні температури з фазовими перетвореннями в металі. На основі експериментальних даних ФТІМС НАН України отримані математичні залежності границі текучості для вуглецевих і легованих сталей в твердому та твердо-рідкому станах. В поєднанні з відомими дослідженнями в'язкості рідкої сталі, опором деформації твердого металу ці залежності достатньо повно описують реологію сталей при ливарно-деформаційних процесах. Зокрема це дозволить проводити математичне моделювання гідродинаміки і деформації металу при безперервному розливанні-прокатуванні сталевих стрічок у валкових ливарно-прокатних агрегатах.

- [8] M.Ya. Brovman, V.A. Nikolaev and V.P. Polukhin, “Resistance to plastic deformation from the hoist in the process of rollless ingot rolling”, *Metals*, 2nd007. No. 4. pp.39–43.
- [9] Yu.Ya. Skok, *Mechanical properties of steel at temperatures near the solidus: Preprint*, Kyiv: Institute of Casting Problems of the Academy of Sciences of Ukraine, 1983, 66 p.
- [10] V.M. Olshansky, N.P. Koval and T.Ya. Sue, “Mathematical modeling of the process of solidification of continuous blanks”, *Metallurgical heat engineering*, No. 2. pp. 188–191, 1999.
- [11] F. Luna Alzetta, “The Danicli ECR Endless Casting Rolling Plant for Specialty Steels-Technology, Innovation and Benefits”, *Iron and Steelmaker*, No. 7, pp. 41–49, 2002.
- [12] Y. Minamimura, T. Kanasawa and K. Tsujita, “Latest technology for cost and productivity of QSP process”, *SEAIQ Quarterly*, No. 2, 30, pp.10–15, 2001.
- [13] V.B. Shum *et al.*, “16 Method of rolling continuously cast billets” Patent of Ukraine, No. 58851 IPC B21B1, OJSC “Donetsk Metallurgical Plant”, stated. 21.10.2010, publ. 26.04. 2011, Bull. No. 8. Available: <http://uapatents.com/4-58851-sposib-prokatki-bezperervnolitozagotovki.html>
- [14] S.S. Zatulovsky, *Suspension casting*, Kyiv: Naukova Dumka, 1981.
- [15] N.N. Berezhnoy *et al.*, “A retrospective analysis of the array of published patents characterizing the development of casting and rolling modules for the period 2000-2013 in Ukraine”, *Technological audit and production reserves*, No. 1/1 (21), pp. 4–7, 2015. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.36167>
- [16] M.M. Berezhny *et al.*, “Foundry-rolling cage”, Patent of Ukraine No. 100153 IPC B21B1, Kryvyi Rih National University. - stated. 05.02.2015, publ. 10.07.2015, Bull. No. 13.
- [17] G.V. Gubin, V.O. Cock. Kryvyi Rih: PE “Publishing House”, 2010.
- [18] V.N. Danchenko, “Progressive metal forming processes”, *Metallurgical and mining industry*. No. 7. pp. 1–8, 2011.
- [19] A.A. Minaev, *Combined metallurgical processes*, Donetsk: Technopark Don GTU UNITECH, 2008.
- [20] V.M. Danchenko *et al.*, *Theory of metal pressure processing*, Dnepropetrovsk: Thresholds, 2008.
- [21] G.V. Gubin *et al.*, “On the processing of used cars”, *Bulletin of Kryvyi Rih Technical University*. Vol. 31, pp. 3–8, 2012.
- [22] V.B. Shum *et al.*, “16 Method of rolling continuously cast billet”, Patent of Ukraine № 58851 IPC B21B1, OJSC “Donetsk Metallurgical Plant”, stated. 21.10.2010, publ. 26.04. 2011, Bull. No. 8. Available: <http://uapatents.com/4-58851-sposib-prokatki-bezperervnolitozagotovki.html>
- [23] V.A. Sklyar, *Progressive energy and resource saving metallurgical technologies*, Textbook for students in the direction of “Metallurgy”, Donetsk, DonNTU, 2014.
- [24] S.S. Zatulovsky, *Suspension casting*, Kyiv: Naukova Dumka, 1981.
- [25] V.A. Chubenko *et al.*, “Doslidzhennya efektyvnosti suspenziynoyi rozlyvky ridkoyi stali u lyvarno-prokatni kliti dlya vyhotovlennya tonkykh smuh”, *Hirnychyy visnyk*, Vol. 101. pp. 183–186, 2016.
- [26] V. Chubenko *et al.*, “Study of cooling rate, crystallization duration and metal discharge coefficient in case of continuous casting into foundry and rolling mills”, *Metallurgical and Mining Industry*. No. 6, pp. 296–300, 2016.

## Реологические характеристики стали при непрерывной валковой разливке-прокатке

А.В. Ноговицын, О.В. Холявик, О.А. Кравчук, А.В. Самойленко, Р.С. Борис

**Проблематика.** В процессе получения полосы в литейно-прокатном устройстве возникает вопрос сочетания процесса горячей прокатки затвердевшего материала и процесса кристаллизации жидкого расплава. Это позволяет реализовать эффективную технологию получения тонколистового проката.

**Цель исследования.** Определение рациональных параметров для выполнения математического моделирования поведения материала при валковой разливке требует четко прописанных рекомендаций. Материал для процесса прокатки – сталь. Исходный материал применялся в твердом, твердо-жидком и жидком состояниях.

**Методика реализации.** Анализ свойств стали проведен на основе результатов экспериментов, полученных в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины. Для анализа реологических свойств стали использовались зависимости предела текучести для легированных и углеродистых сталей в определенном интервале температур. Выбранный интервал температур включает солидус и твердо-жидкое состояние стали, расположенное выше 0,8 Tпл.

**Результаты исследования.** По результатам исследований выполнен анализ реологических свойств стали в твердом, твердо-жидком и жидком состояниях во время непрерывной разливки-прокатки на валках. Использование полученных зависимостей позволяет выполнять математическое моделирование деформации и гидродинамики материала при непрерывной разливке-прокатке стальных полос с применением валковых литейно-прокатных устройств.



**Выводы.** Построенные зависимости совместно с исследованиями вязкости стали в жидком состоянии и сопротивлением деформации стали в твердом состоянии наиболее полно описывают реологические свойства сталей при литейно-деформационных процессах. Полученные зависимости позволяют реализовать сверхэффективную технологию получения тонколистового проката.

**Ключевые слова:** непрерывная прокатка, валковая разливка, реологические характеристики, предел текучести, интервал температур, солидус, ликвидус, сопротивление деформации

## Rheological characteristics of steel in continuous roll casting-rolling

A.V. Nogovitsyn, O.V. Kholiavik, O.A. Kravchuk, O.V. Samoilenko, R.S. Boris

**Problems.** In the process of obtaining a strip in a casting and rolling device, the question arises of combining the process of hot rolling of the solidified material and the process of crystallization of the liquid melt. This makes it possible to implement an efficient technology for producing thin-sheet products.

**Purpose of the study.** Determination of rational parameters for performing mathematical modeling of material behavior during roll casting requires clearly defined recommendations. The material for the rolling process is steel. The starting material was used in solid, solid-liquid and liquid states.

**Implementation technique.** The analysis of the properties of steel was carried out on the basis of the results of experiments obtained at the Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine. To analyze the rheological properties of steel, the dependences of the yield stress for alloyed and carbon steels were used in a certain temperature range. The selected temperature range includes solidus and solid-liquid state of steel, located above 0.8 melting point.

**Research results.** Based on the research results, the analysis of the rheological properties of steel in solid, solid-liquid and liquid states during continuous casting-rolling on rolls was carried out. The use of the obtained dependencies makes it possible to perform mathematical modeling of the deformation and hydrodynamics of the material during continuous casting-rolling of steel strips using roll casting-rolling devices.

**Conclusions.** The constructed dependences, together with studies of the viscosity of steel in the liquid state and the resistance of steel to deformation in the solid state, most fully describe the rheological properties of steels during casting-deformation processes. The obtained dependences will make it possible to implement an ultra-efficient technology for producing thin-sheet rolled products.

**Keywords:** continuous rolling, roll casting, rheological characteristics, yield stress, temperature range, solidus, liquidus, deformation resistance