

Влияние геометрии кузнечного слитка на его структурную неоднородность

А.Н. Ромашкин, Г.А. Эхвая, С.И. Марков, В.С. Дуб, И.А. Иванов, А.Н. Мальгинов, Д.С. Толстых

Введение

Первичная литая структура слитков является важным фактором, определяющим уровень свойств металлоизделия.

Критериями, количественно описывающими литую структуру слитка, являются расстояние между осями дендритов первого и второго порядков, размер структурных зон и размер, так называемого, литого зерна (блок металла с выраженным направлением кристаллографической ориентации). Помимо абсолютного значения для данных критериев также важна дисперсия их значений. Для обеспечения стабильного максимального уровня свойств металла литая структура должна быть мелкодисперсной и однородной. Свойства металла конечного изделия определяются, прежде всего, размером действительного зерна (Рис. 1).

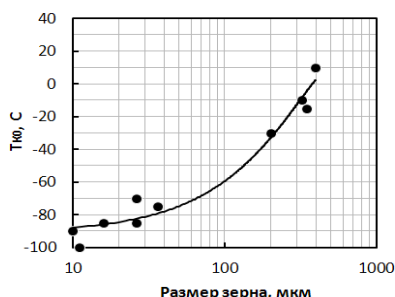


Рис. 1 – Зависимость значения критической температуры хрупкости (T_K) от размера действительного зерна стали 15X2НМФА [1]

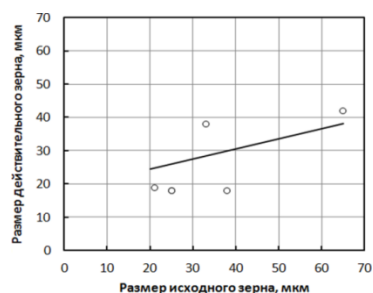


Рис. 2 – Взаимосвязь между размером исходного аустенитного и действительного зерна [2]

Значение последнего критерия при условии постоянства технологических факторов зависит от размеров исходного аустенитного зерна (Рис. 2), которое, в свою очередь, зависит от межосных дендритных расстояний.

К сожалению, в настоящее время отсутствует достоверная информация о количественной взаимосвязи размеров зерна на каждом из этапов (затвердевание-ковка-термообработка) передела в зависимости от значений технологических параметров. При этом теоретическая база, позволяющая оценить влияние технологических параметров на трансформацию зеренной структуры существует и в настоящее время достаточно широко применяется в компьютерном моделировании. Так, например, изменение зеренной структуры в процессековки / штамповки можно оценить с помощью системы уравнений Джонсона-Меля-Аврами-Колмогорова (JMAK — Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov) [4]. Более подробный анализ математических моделей, которые могут быть использованы для оценки эволюции зеренной структуры приведен в работе [5].

Однако на практике, производитель анализирует зерненую структуру металла заготовок лишь при проведении сдаточных испытаний, т.е. уже после завершения всех этапов передела. В результате современная технология производства рассматривается как «чёрный ящик» в отношении размеров зерна поковки: известны лишь входящие в систему параметры и одно выходящее значение среднего размера действительного зерна; характер эволюционных превращений зеренной структуры по ходу сквозного передела неизвестен. Подобное состояние дел обусловило необходимость разработки технологических режимов с запасом на самый худший вариант (соответствующий наиболее крупному исходному зерну), что значительно увеличило продолжительность режима термической обработки и обусловило соответствующий перерасход ресурсов и энергии.

Поэтому управление параметрами исходной литой структуры может дать возможность воздействовать на абсолютный уровень и разброс свойств металла конечного изделия, а также снизить длительность (рис. 3) и энергоёмкость производственного цикла.

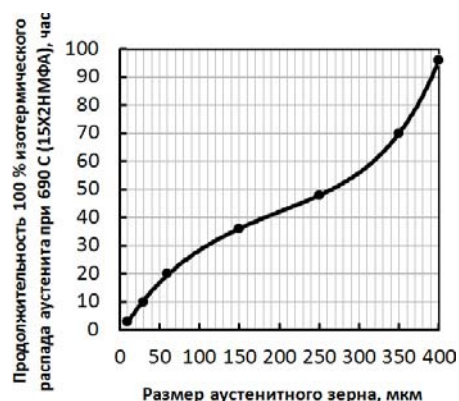


Рис. 3 – Зависимость длительности изотермического отжига от размеров исходного зерна для стали 15X2НМФА

Степень влияния литой структуры на свойства конечного изделия зависит, прежде всего, от схемы и интенсивности деформации заготовки в процессековки и штамповки и параметров термической обработки.

Например, в случае, когда технологическая схема производства включает этап кузнечной обработки со степенью укова 3 и более, влияние литой структуры может быть полностью нивелировано еще на этапе кузнечного передела и свойства конечного металлоизделия будут одинаково высоки как при использовании слитка с грубой литой структурой, так и с мелкой. Однако, если этап кузнечной обработки отсутствует или степень укова находится в пределах от 0,5 до 2,0, что может иметь место в отдельных частях поковки, то влияние литой структуры может быть весьма существенным. Также влияние литой структуры значимо при производстве заготовок из крупных слитков, ввиду резкого возрастания трудоемкости обеспечения необходимого обжатия по всему сечению поволоков из таких слитков. Поэтому вопрос оптимизации и прогнозирования параметров литой структуры важен для литых или деформированных изделий, а также крупногабаритных деталей, получаемых, в том числе с использованием интенсивной кузнечной обработки.

Предлагаемая работа является продолжением цикла исследований, проводимых в АО НПО «ЦНИИТМАШ» [6...8] и направленных на оптимизацию геометрии крупных кузнечных слитков с целью обеспечения оптимального сочетания их химической, физической и структурной неоднородности.

Методика

Изучение влияния геометрии слитков на их структурную неоднородность было проведено с использованием компьютерного моделирования затвердевания слитков массой 50, 300 и 550 тонн из стали 15X2НМФА (табл. 1). Моделирование проводили с использованием разработанной в АО НПО «ЦНИИТМАШ» программы «Крупный слиток» [9].

Табл. 1

Заданный в соответствии с ТУ 0893-014-00212179 2003 химический состав стали марки 15X2НМФА

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	V	Cu	Al
0,15	0,27	0,59	1,8	2,1	0,005	0,007	0,55	0,10	0,01	0,02

Исходные данные были следующие. Плотность жидкого расплава составляет $7,1 \text{ т/м}^3$, плотность твердого — $7,8 \text{ т/м}^3$. Коэффициент объемной усадки жидкой стали составляет $0,010 \text{ %/К}$; твердой стали — $0,006 \text{ %/К}$.

Материал разливочной оснастки — сталь марки 15Л; прибыльная надставка утеплена одним слоем шамотного кирпича марки ШЛ-04 (толщина слоя — $0,065 \text{ м}$) и 2 слоями теплоизолирующей вставки ProFax (толщина слоя — $0,065 \text{ м}$); зеркало металла засыпают вермикулитом через 5 мин после окончания заливки металла в изложницу. Теплоту затвердевания принимали равной 255 кДж/кг .

Зависимость теплофизических свойств материалов разливочной оснастки приведена в табл. 2 и проиллюстрирована на рис. 4 и рис. 5.

Температурная зависимость теплопроводности (числитель, Вт/(м·К)) и теплоемкости (знаменатель, кДж/(кг·К)), использованных при моделировании материалов.

Материал	Значение параметра при заданной температуре										Источник
	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1400	
35Л, 15Х2НМФА	50	44	40	38	37	36	33	27	28	33	[10]
	0,7	0,62	0,58	0,64	0,71	0,82	1,24	0,87	0,62	0,68	
Асбест (КАОН-1)	$\lambda = 0,12 + 0,24 \cdot 10^{-3} \cdot t; C_p = 0,8 + 0,2974 \cdot 10^{-3} \cdot (t + 273) - 0,1628 \cdot 10^{-5} \cdot (t + 273)^2$										[11]
	0,14	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26	0,29	0,31	0,36	0,46	
	0,79	0,87	0,92	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,17	1,29	
ША-38	$\lambda = 0,837 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot t; C_p = 0,1646 + 0,159 \cdot 10^{-3} \cdot t - 6,4 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$										[11]
	0,90	0,95	1,01	1,07	1,13	1,19	1,24	1,30	1,42	1,65	
ProFax	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	данные ЦНИИТМ АШ
	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,24	0,26	0,48	0,6	
Вермикулит	$\lambda = 0,051 + 0,148 \cdot 10^{-3} \cdot t; C_p = 0,68 + 0,221 \cdot 10^{-3} \cdot (t + 273) - 0,044 \cdot 10^{-5} \cdot (t + 273)^2$										[11]
	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15	0,17	0,20	0,26	
	0,73	0,76	0,79	0,82	0,84	0,87	0,89	0,91	0,96	1,05	

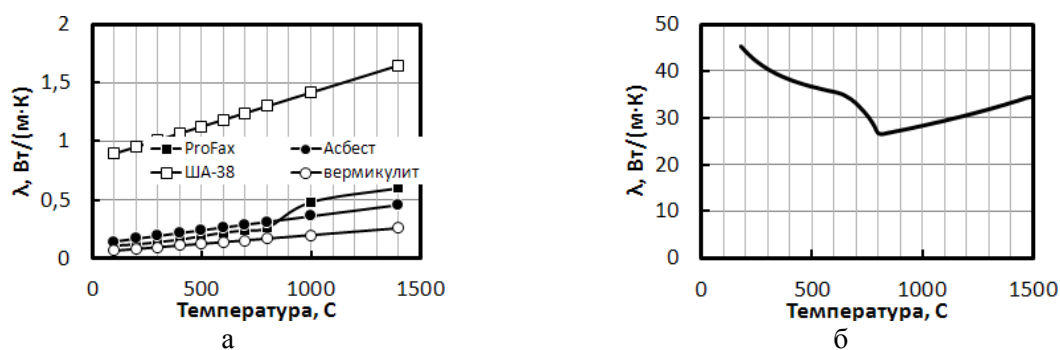


Рис. 4 – Температурная зависимость теплопроводности, использованных при моделировании теплоизоляционных (а) и металлических (б) материалов

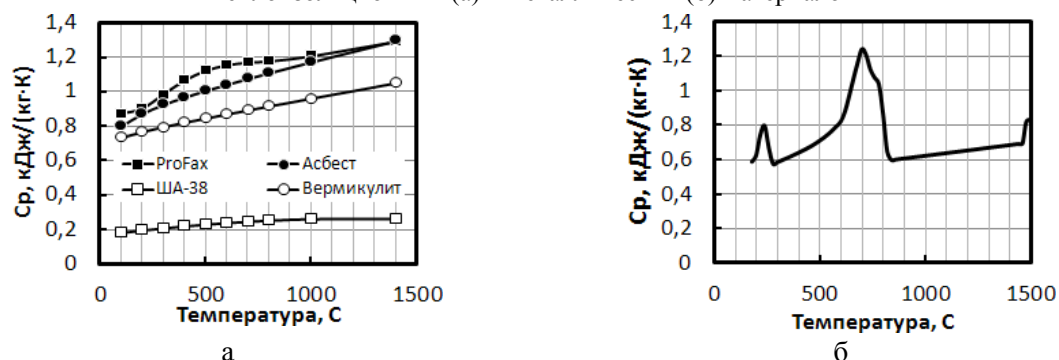


Рис. 5 – Температурная зависимость теплоемкости, использованных при моделировании теплоизоляционных (а) и металлических (б) материалов

Скорость и продолжительность разливки задавали, исходя из предложенной в работе [12] формулы (1). Температуру металла перед разливкой принимали равной 1610 °С; температура оснастки была следующей: изложница — 100 °С, прибыльная надставка — 150 °С, поддон — 200 °С.

$$v_{\text{разл}} = 0,5 \cdot \sqrt{M} \quad (1)$$

где: $v_{\text{разл}}$ — массовая скорость разливки стали в слиток, т/мин;
 M — масса слитка, т.

Доля прибыльной части слитка была постоянной и составляла 20 % от общей массы слитка, при этом она имела цилиндрическую форму и ее нижний диаметр отличался от верхнего диаметра тела

слитка на 100 мм. Кюмпель слитка имел форму усеченного конуса. Размеры кюмпеля для исследованных слитков представлены ниже:

Табл. 3

Геометрические размеры кюмпеля слитков массой 50; 100 и 550 т

	50 тонн	300 тонн	550 тонн
высота нижней части, мм	200	300	350
высота верхней части, мм	200	300	400
нижний диаметр, мм	670	1150	1300
средний диаметр, мм	840	1440	1650
верхний диаметр, мм	1200	2000	2500

Размеры каждого слитка в соответствии со схемой на рис. 6 приведены в табл. 4.

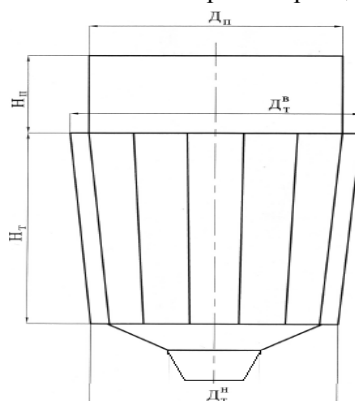


Рис. 6 – Схематическое изображение слитков

Табл. 4

Геометрические размеры исследованных слитков массой 50, 300 и 550 т, мм

G, т	H/D, дол. ед	K, %	H _г , мм	D _г ^в , мм	D _г ^н , мм	H _п , мм	D _п , мм
50	1,0	2	1862	1881	1844	702	1781
		10	1862	1955	1769	647	1855
		18	1862	2030	1695	598	1930
	1,5	2	2440	1651	1602	925	1551
		10	2440	1749	1505	819	1649
		18	2440	1846	1407	730	1746
	2,0	2	2956	1508	1449	1124	1408
		10	2956	1626	1330	956	1526
		18	2956	1744	1212	824	1644
300	1,0	2	3384	3418	3350	1214	3318
		10	3384	3553	3215	1121	3453
		18	3384	3689	3079	1038	3589
	1,5	2	4434	3001	2912	1588	2901
		10	4434	3178	2734	1411	3078
		18	4434	3355	2557	1261	3255
	2,0	2	5372	2740	2632	1918	2640
		10	5372	2954	2417	1640	2854
		18	5372	3169	2002	1418	3069
550	1,0	2	4140	4182	4099	1470	4082
		10	4140	4347	3933	1358	4247
		18	4140	4513	3768	1258	4413
	1,5	2	5426	3671	3563	1921	3571
		10	5426	3888	3346	1707	3788
		18	5426	4105	3129	1527	4005
	2,0	2	6573	3352	3221	2316	3252
		10	6573	3615	2958	1983	3515
		18	6573	3878	2695	1716	3778

В качестве варьируемых параметров рассматривали массу слитка, отношение высоты тела слитка к его среднему диаметру (Н/Д) и конусность тела слитка (К). В качестве функции отклика — значения расстояний между осями дендритов первого порядка (d_I).

Значение межосных расстояний определяли по результатам решения тепловой задачи затвердевания и охлаждения слитка, с использованием полученного в АО НПО «ЦНИИТМАШ» уравнения (2) :

$$d_I = 204 \cdot v^{-0,383}, \quad (2)$$

где: d_I — межосное расстояние, мкм;
 v — скорость охлаждения, К/с.

Правомерность использования такой методики расчета подтверждена результатами многочисленных металлографических исследований [13...20] образцов металла, затвердевшего с различной скоростью охлаждения. Примеры подобных зависимостей, полученные для других марок стали, представлены на рис. 7 и в Табл. 5.

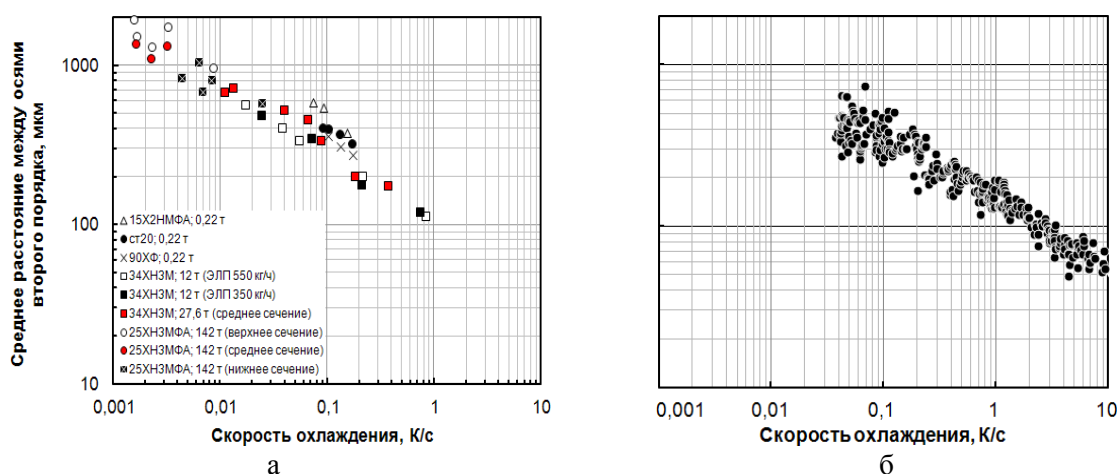


Рис. 7 – Взаимосвязь значений межосных расстояний со скоростью охлаждения, выявленная по результатам экспериментальных исследований [13] (а) и работ [14 и 15] (б)

Табл. 5

Зависимости для расчета расстояний между осями первого и второго порядка (мкм), полученные различными исследователями

Формула	Примечание	Источник
$d_{II} = 146 \cdot v^{-0,386}$	Выведено для низколегированной стали; зависимость представлена на рис. 7б, [C] = 0,14...0,88 %	[14]
$d_I = 283 \cdot v^{-0,49}$ $d_{II} = 109 \cdot v^{-0,44}$	Выведено для стали с содержанием 0,59 % С и 1,1 % Мп	[15]
$d_I = 279 \cdot v^{-0,206} \cdot [C]^{-0,019-0,492 \cdot [C]}$ $d_{II} = 109 \cdot v^{-0,44}$	Выведено на основании анализа низколегированной стали различных марок; значения d_I определяли на стали с содержанием 0,15...1,0 % С; значения d_{II} определяли при < 0,53 % С	[16]
$d_{II} = 143,9 \cdot v^{-0,362} \cdot [C]^{-0,550-1,996 \cdot [C]}$	< 0,15 % С	[17]
$d_{II} = 113 \cdot v^{-0,38}$	0,15 % С (по результатам обработки данных [19])	[18]

Скорость охлаждения рассчитывали как произведение определяемых при компьютерном моделировании градиента температуры и линейной скорости продвижения фронта кристаллизации (изотермы солидус)

Результаты экспериментов и их обсуждение

Качественная картина изменения значений межосных расстояний по сечению слитка представлена на

Рис. 8. Полученные данные сравнили с экспериментальными результатами исследования параметров макроструктуры кузнечных слитков (Рис. 9). Было выявлено, что место расположения зоны с наиболее грубой структурой совпадает с местом расположения наиболее загрязненных участков темплета и с так называемой зоной внецентренной канальной ликвации (ЗВКЛ). Наиболее грубая

структура, как и ЗВКЛ, располагается в подприбыльной части слитка на удалении примерно 30...40 % радиуса от оси.

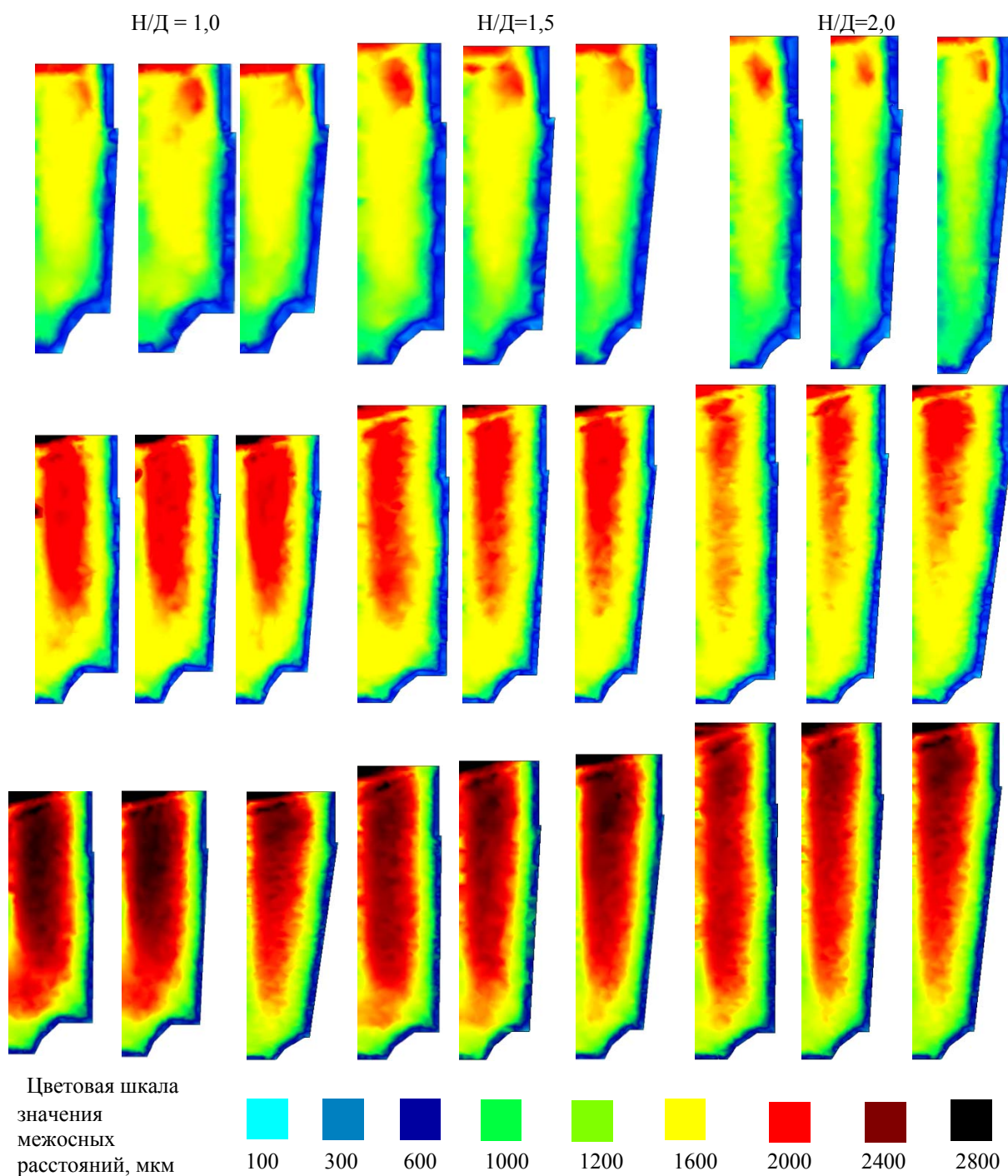


Рис. 8 – Изменение значения расстояния между осями дендритов по сечения слитка массой 50 (верхний ряд иллюстраций), 300 (средний ряд иллюстраций) и 550 т (нижний ряд иллюстраций) различной геометрии из стали 15X2НМФА

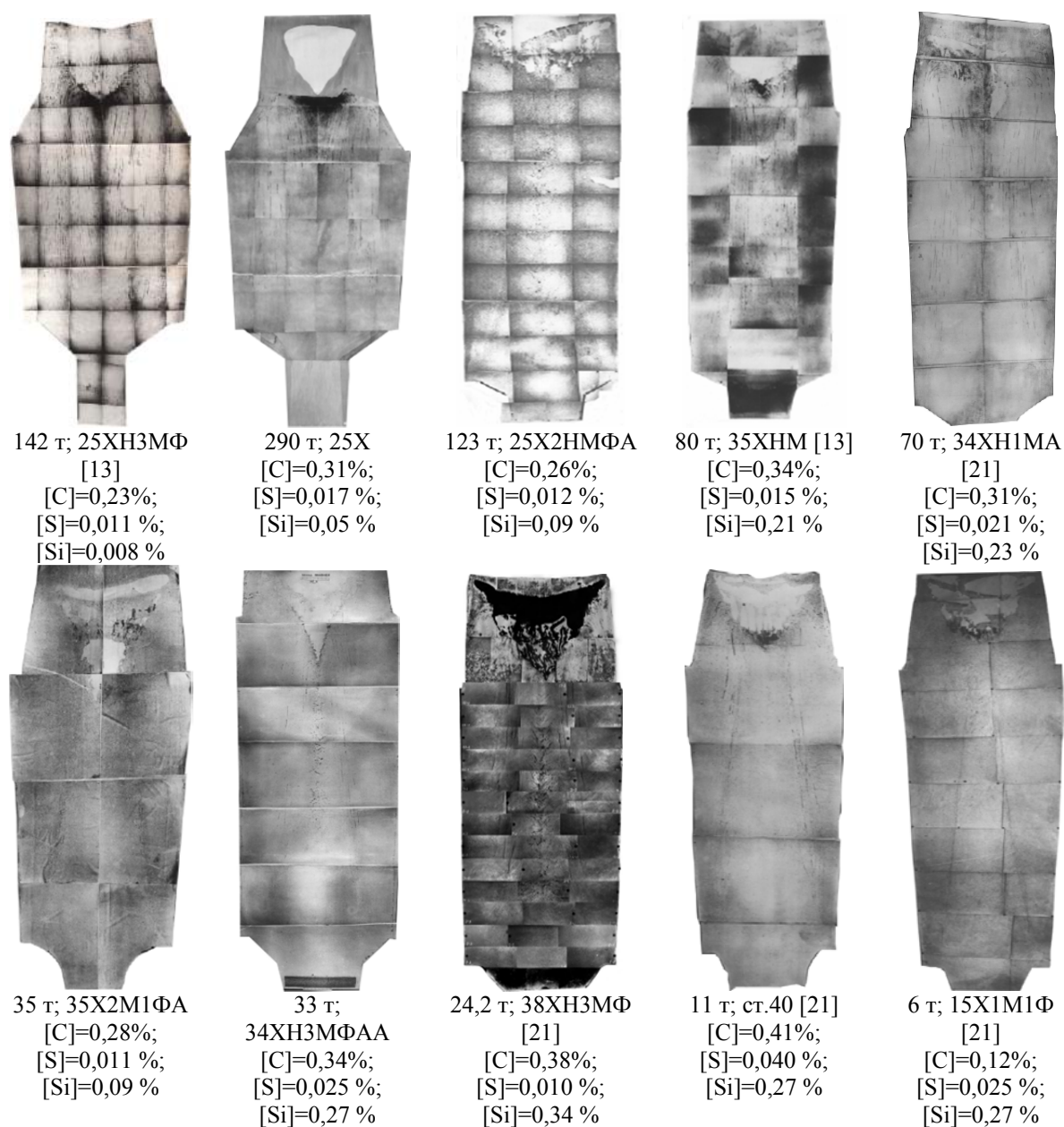


Рис. 9 – Фото макротемплетов кузнечных слитков различной массы

По мере приближения к придонной части слитка ширина наиболее загрязненной части слитка и зоны наиболее грубой структуры сужается. При этом совпадение особенностей расположения ЗВКЛ имеет место, как для крупных слитков, так и для относительно мелких (массой 10...100 т). Это совпадение является естественным, так как формирование ЗВКЛ происходит именно там, где структура наиболее грубая [13]. Поэтому информация о структурной неоднородности может быть полезна при разработке технологических приемов уменьшения пораженности слитка подобными дефектами или выведения их в не критичную часть слитка. Следует отметить, что более точный прогноз о расположении в слитке ЗВКЛ следует делать с использованием соответствующего модуля расчета программы «Крупный слиток» [22, 23].

На Рис. 10 представлены графики, отображающие полученную на основании результатов компьютерного моделирования количественную взаимосвязь значений межосных расстояний с размерами слитка. Расстояние между осями монотонно увеличивается от придонной части слитка к подприбыльной и экстремально возрастает по мере удаления от поверхности. Максимальные значения, как уже было сказано, наблюдаются на удалении, примерно 40 % радиуса от оси слитка для подприбыльного и среднего сечений; для придонного сечения наиболее грубая структура формируется на удалении примерно 10...20 % от оси. Сдвиг максимальных значений межосных расстояний к оси в придонной области слитка хорошо заметен на иллюстрациях, отображающих качественную картину распределения значений d_i по продольному сечению слитка (

Рис. 8). Как видно, вблизи компеля левая и правая зоны слитка, затвердевающие при минимальных скоростях сливаются, обуславливая описанный выше сдвиг. Формирование подобной, простирающейся на всю приосевую зону слитка, области с грубой литой структурой, по всей видимости, связано с тем, что при ее затвердевании отсутствует эффект схлопывания (затвердевания при повышенных скоростях) жидкой лунки вследствие резкого увеличения удельной площади ее охлаждения.

Следует отметить, что некоторое различие в поведении кривых вблизи поверхности (при $R = 1,0$) связано с концевыми эффектами, наличие которых, в свою очередь, обусловлено несовершенством разбивки конечно-элементной модели.

В целом, выявленный характер изменения значений межосных расстояний по сечению слитков соответствует отмечаемому на практике при анализе экспериментальных данных (Рис. 11)

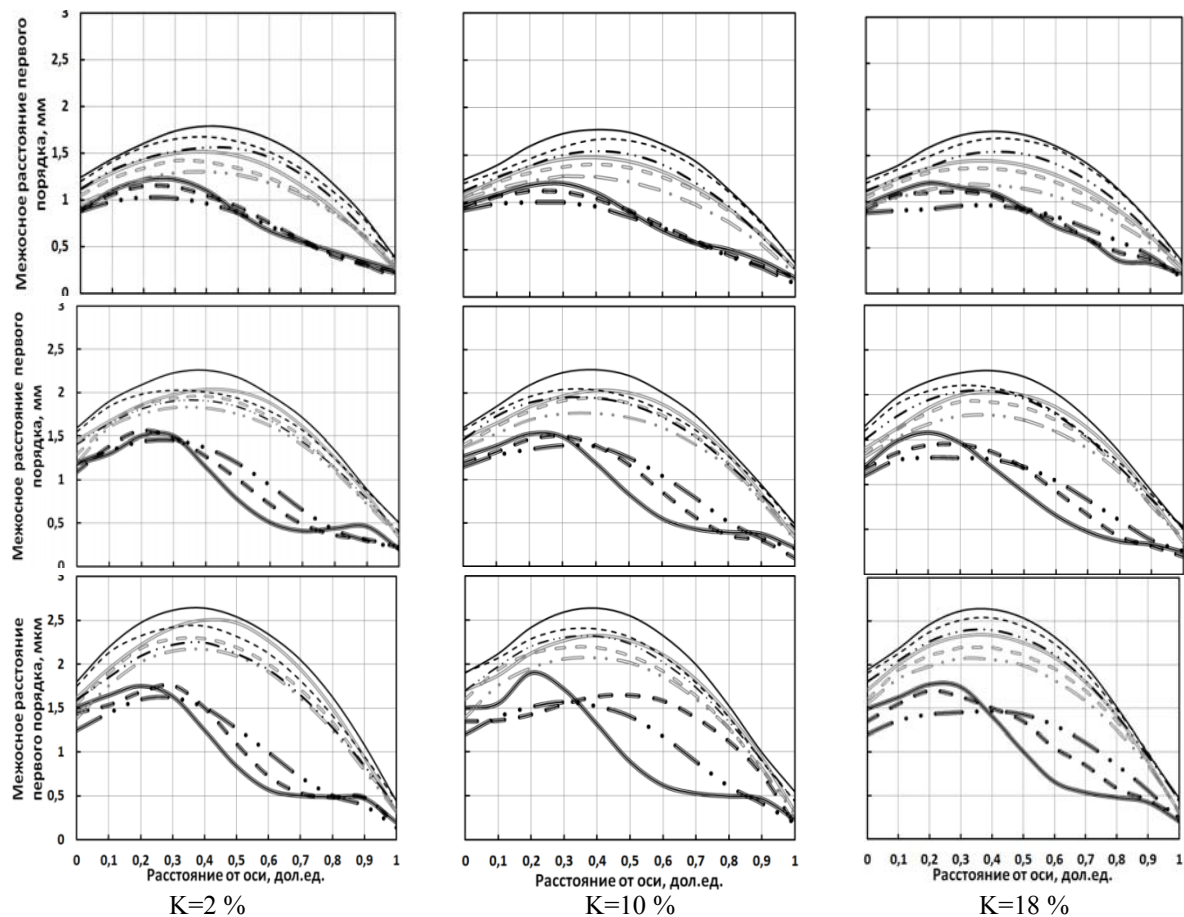


Рис. 10 – Изменение значений межосных расстояний первого порядка по радиусу слитков различной конфигурации массой 50 (верхний ряд графиков); 300 (средний ряд графиков) и 550 т (нижний ряд графиков) в подприбыльном (черная линия), среднем (двойная серая) и придонном (тройная черная линия) сечениях: $H/D = 1$ — сплошные линии; $H/D = 1,5$ — пунктирные линии и $H/D = 2,0$ — штрихпунктирные линии.

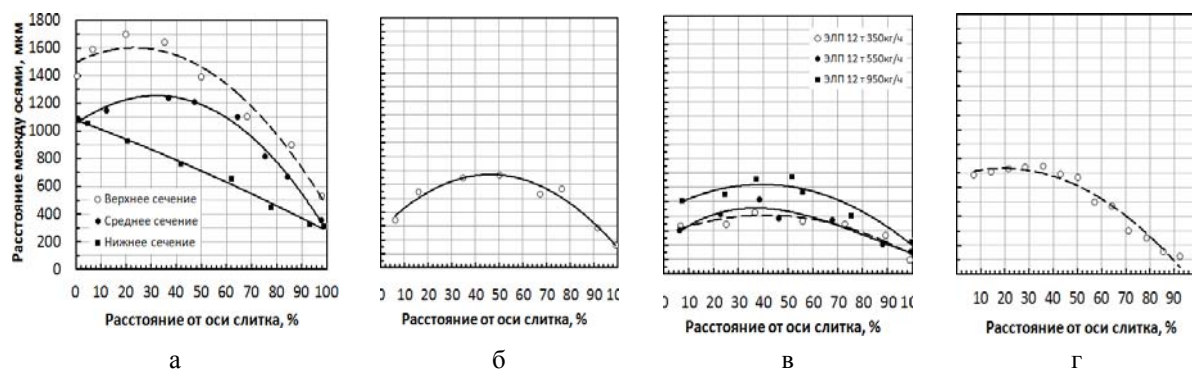


Рис. 11 – Изменение расстояния между осями дендритов по сечению слитков различной массы: а — слиток массой 142 т [13]; б — слиток массой 27,6 т [13]; в — слиток ЭЛП массой 12 т (массовая

скорость наплавления — 350 (○); 550 (●) и 950 кг/ч (■) [13]; данные работы [24] (масса слитка не указана).

С целью демонстрации адекватности применяемой модели было проведено дополнительное моделирование затвердевания 142-т слитка, металл которого был подробно изучен специалистами Ижорских заводов и АО НПО «ЦНИИТМАШ» в рамках работ по освоению производства крупных кузнечных слитков в СССР. Сравнение расчетных данных с экспериментальными (Рис. 12) показало хорошее соответствие: для подприбыльной и среднего сечений расхождение с экспериментальными данными не превышает 20 %.

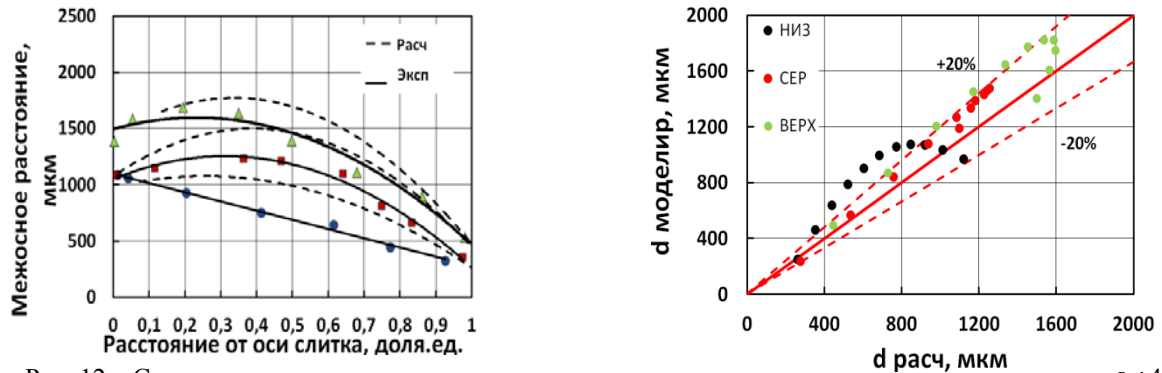


Рис. 12 – Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными слитка массой 142 т

Анализ представленных на Рис. 10 данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Наименьшие значения межосных расстояний характерны для нижней части слитка, наибольшие — подприбыльной;
2. по мере увеличения НД максимальные значения межосных расстояний уменьшаются, т.е. структурная однородность слитка возрастает;
3. при увеличении конусности межосное расстояние в придонной части слитка практически не меняется, однако достаточно значительно увеличивается в подприбыльной части слитка с НД = 1,5 и 2,0 и ведет себя, наоборот, для слитка с НД = 1; т.е. для слитков первых двух типов наибольшая структурная однородность имеет место при нулевой конусности; для слитка второго типа (с НД = 1), наоборот, — при максимальной конусности; в целом влияние К – незначительно

Различие во влиянии конусности для слитков с НД с одной стороны, равной 1,0, и 1,5 и 2,0, с другой, связано со следующими причинами. При увеличении конусности происходит расширение наиболее горячей подприбыльной части слитка, т.е. той части, где металл должен затвердевать наиболее долго и, соответственно, где должна иметь место наиболее грубая структура. Однако ввиду необходимости выполнения обозначенных ранее условий постоянства массовой доли прибыльной части слитка и постоянства отличия ее диаметра (на 100 мм) от верхнего диаметра тела слитка, увеличение конусности сопровождается уменьшением высоты прибыльной части. Это приводит к росту площади охлаждения прибыли через зеркало металла и уменьшению ее теплоаккумулирующей способности. Следствием этого является более быстрое охлаждение подприбыльной части слитка и соответственно, более мелкая структура для слитка с большой конусностью.

По итогам компьютерного моделирования были выведены регрессионные зависимости типа (3) для расчета значений межосных расстояний в подприбыльном, среднем и придонном сечениях в зависимости от массы и конфигурации слитка. Значения коэффициентов регрессии данного уравнения, для каждого из этих сечений представлено в Табл. 6. Построенные по выведенным уравнениям поверхности представлены на рис. 13.

$$d_i = a + b \cdot R + c \cdot G + d \cdot H/D + e \cdot R \cdot H/D \cdot G + f \cdot R^2 + g \cdot G^2 + h \cdot R^2 \cdot H/D \cdot G, \quad (3)$$

Табл. 6

Значения коэффициентов регрессии в формуле (3)

	a	b	c	d	e	f	g	h
Верхнее сечение	1210	2976	1,7	-124	0,4	-3762	-0,0006	-1,0
Среднее сечение	900	145	1,0	55	0,9	-1045	0,0004	-1,2
Нижнее сечение	947	2589	2,3	115	0,8	-3219	-0,0016	-1,3

Зависимость М.Р. от Н/Д и R

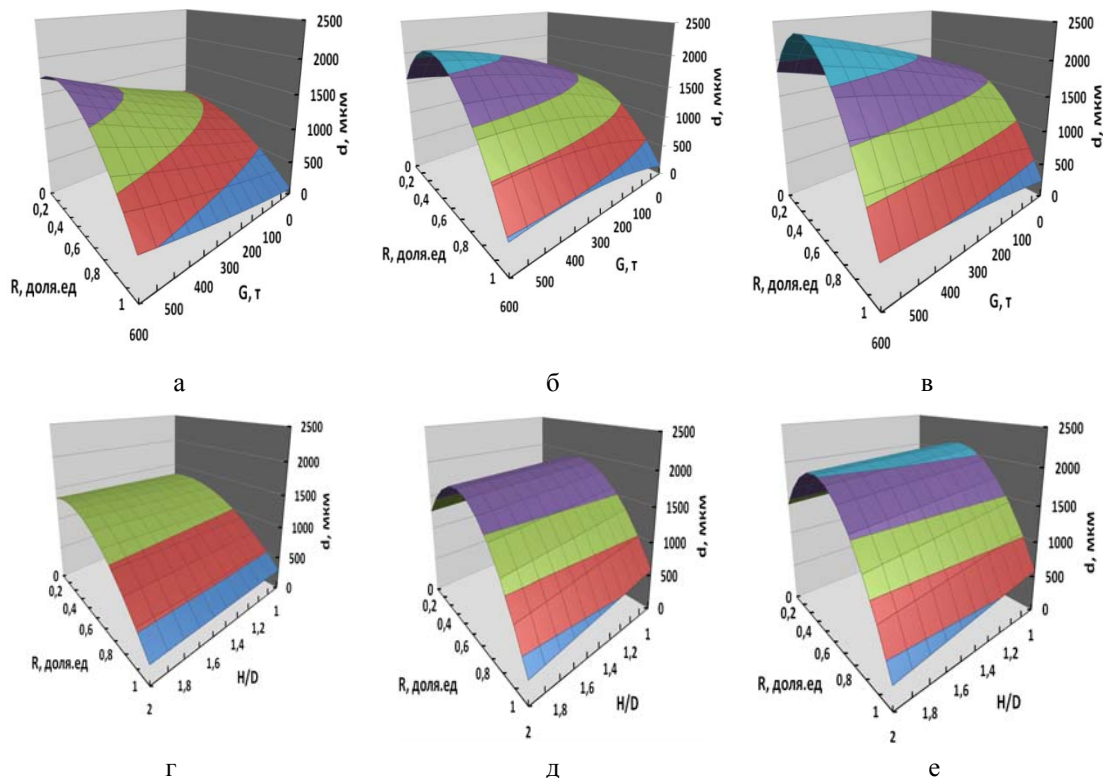


Рис. 13 – Изменение значений межосных расстояний в слитках различной конфигурации и развеса: а, б, в – $H/D = 1,5$; а, г – нижнее сечение слитка; б, д – среднее сечение; в, е – верхнее сечение; г, д, е – $G=300$ т

Применение данных формул позволяет относительно быстро оценить возможную структурную неоднородность кузнечного слитка и сделать на основании этого выбор в пользу той или иной его конфигурации. Наличие подобной информации позволяет учесть ее при разработке технологического процесса дальнейшего передела слитка с целью обеспечения заданной зеренной структуры заготовки и минимальной продолжительности технологического цикла.

Заключение

По результатам компьютерного моделирования затвердевания слитков различной массы и конфигурации из стали 15X2НМФА исследовано влияние изменения соотношения H/D и конусности на изменение расстояния между осями первого порядка дендритов по сечению слитка. Показано, что дисперсность структуры и ее неоднородность в значительной мере зависят от соотношения H/D ; конусность оказывает существенно меньшее влияние.

Показано, что увеличение значения H/D приводит к измельчению структуры и повышению ее однородности. При увеличении массы структура становится грубее и неоднороднее.

Получены уравнения, позволяющие прогнозировать значения межосных расстояний по сечению слитков различной конфигурации и массы из стали 15X2НМФА.

Список литературы

1. Чернобаева А.А. Исследование влияния температурно-временных параметров термической обработки на структурную наследственность стали 15Х2НМФА. Дисс. канд. Техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ. 1989. 198 с.
2. Дурынин В. А., Солнцев Ю. П. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышение ресурса изделий из крупных поковок ответственного назначения. СПб: ХимИздат. 2006. 272 с.
3. Борисенко А.Ю., Кононенко А.А., Бабаченко А.И. и др. Микроструктурные исследования формирования первичного зерна аустенита после кристаллизации углеродистых сталей с 0,5...0,7% С // Доповіді Національної академії наук України. 2010. № 9. С. 70...77
4. Avrami M. Kinetics of phase change. II: transformation-time relations for random distribution of nuclei // Journal of Chemical Physics. 1940. V. 8. P. 212.
5. Исупова И.Л., Трусов П.В. Обзор математических моделей для описания фазовых превращений в сталях. Вестник ПНИПУ. 2013. Механика. № 3. С. 157...191.
6. Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н., Толстых Д.С. и др. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем // Электрометаллургия. 2013. №.6 С. 15...23.
7. Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н. и др. Влияние геометрии слитка на его химическую неоднородность. Ч. 1 // Metallurg. 2013. № 10. С. 25...33.
8. Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н. и др. Влияние геометрии слитка на его химическую неоднородность. Ч. 2 // Metallurg. 2013. № 12. С. 19...26.
9. Дуб В. С., Ромашкин А. Н., Макарычева Е. В. и др. Метод разработки технологии производства кузнечных слитков // Тяжелое машиностроение. 2012. № 7. С. 11...23.
10. CompuTherm Material Thermodynamic Databaseю ProCast.
11. Советкин В.Л., Федяев Л.А. Теплофизические свойства веществ. Свердловск: УПИ. 1990. 161 с.
12. Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н. Основные тенденции развития технологии разлива стали в слитки // Metallurg. 2013. № 6. С. 24...29
13. Дуб В. С. Исследование внецентренной ликвации и разработка методов подавления ее развития в крупных слитках. Дисс. докт. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ. 1980. Т. 1, 2.
14. Suzuki A., Suzuki T., Nagaoka Y. et al. Nippon Kingaku Gakkai Shuho, 32 (1968). P. 1301.
15. Jacobi H. and Schwerdtfeger K. // Metall. Trans. A, 7A (1976). P. 811.
16. El-Bealy M. and Thomas B. G. // Metall. Mater. Trans. B, 27B. 1996. P. 689.
17. Won Y. M. and Thomas B. G. // Metall. Mater. Trans. A, 32A. 2001. P. 1755.
18. Cicutti and R. Boeri // Scr. Mater., 45 (2001), 1455.
19. Jernkontoret: A guide to the solidification of steels. Jernkontoret, Stockholm. 1977.
20. Голод В.М., Емельянов К.И., Орлова И. Г. Дендритная микронеоднородность литой стали: обзор проблем и их компьютерный анализ // Черные металлы. 2013. № 9. С. 25...32.
21. Шелухина Ю.М. Исследование внеосевой ликвационной неоднородности в крупных кузнечных слитках и поковках. Дисс. канд. техн. наук. Волгоград, 2009. 123 с.
22. Дуб В.С., Копелиович Д.Д., Ромашкин А.Н. и др. Влияние технологических параметров на размер зоны внецентренной ликвации. Ч. I. Влияние состава разливаемой стали на размер зоны внецентренной ликвации // Электрометаллургия. 2013. № 2. С. 24...32.
23. Дуб В.С., Копелиович Д.Д., Ромашкин А.Н. и др. Влияние технологических параметров на размер зоны внецентренной ликвации. Ч. II. Влияние состава разливаемой стали на размер зоны внецентренной ликвации // Электрометаллургия. 2013. № 4. С. 38...43.
24. Radovic Z., Jaukovic N., Jalovik M. et al. Positive segregation as a function of buoyancy force during steel ingot solidification // Science and technology of advanced materials. 2008. V. 9. P.1...7.