

УДК 621.74

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-38-53>

Научная статья

Research article



Эффективность многопоточных вычислений в системах компьютерного моделирования литейных процессов

В.Е. Баженов¹, А.В. Колтыгин¹, А.А. Никитина¹, В.Д. Белов¹, Е.А. Лазарев²

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

² ПАО «ОДК-Кузнецов»

443009, Россия, г. Самара, ул. Заводское шоссе, 29

✉ Вячеслав Евгеньевич Баженов (V.E.Bagenov@gmail.com)

Аннотация: Применение систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) становится обязательным при разработке литейной технологии в авиации и других наукоемких областях техники. В связи с увеличением числа расчетных ядер в современных процессорах актуальным становится осуществление многопоточных вычислений. В работе оценивалась эффективность многопоточных вычислений при моделировании литейных процессов с помощью конечно-элементных СКМ ЛП «ProCast» и «ПолигонСофт», использующих архитектуры параллельных расчетов с распределенной (DMP) и общей (SMP) памятью соответственно. Для вычислений применяли компьютеры на базе платформ от компаний «Intel» и «AMD». Число расчетных потоков варьировали от 4 до 32. Эффективность оценивали по приросту скорости расчета заполнения и затвердевания отливки «ГП25» из сплава МЛ10, а также решения сложной задачи моделирования заполнения и затвердевания корпусных отливок из никелевого жаропрочного сплава с учетом радиационного теплообмена. Показано, что минимальное время расчета в СКМ ЛП «ProCast» наблюдается при использовании 16 вычислительных потоков. Причем это характерно для обеих вычислительных систем (на процессорах «Intel» и «AMD»), и увеличение числа потоков выше этого предела не имеет практического смысла. Снижение производительности в данном случае может быть связано с наличием малопроизводительных энергоэффективных ядер в случае применения системы на процессоре «Intel», а также полной загрузки физических ядер и уменьшением частоты ядер для системы на процессоре от «AMD». Распараллеливание задачи моделирования в СКМ ЛП «ПолигонСофт» менее эффективно, чем в СКМ ЛП «ProCast», вследствие реализации архитектуры с общей памятью. В то же время, несмотря на значительную разницу в эффективности распараллеливания, задача затвердевания отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ПолигонСофт» и «ProCast» решается за достаточно близкое время.

Ключевые слова: компьютерное моделирование литейных процессов, многопоточные вычисления, ProCast, ПолигонСофт, SMP, DMP.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках постановления Правительства № 218 по соглашению о предоставлении субсидии № 075-11-2022-023 от 06.04.2022 г. «Создание технологии изготовления уникальных крупногабаритных отливок из жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей, ориентированной на использование отечественного оборудования и организацию современного ресурсоэффективного, компьютероориентированного литейного производства».

Для цитирования: Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Никитина А.А., Белов В.Д., Лазарев Е.А. Эффективность многопоточных вычислений в системах компьютерного моделирования литейных процессов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):38–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-38-53>

The efficiency of multithreaded computing in casting simulation software

V.E. Bazhenov¹, A.V. Koltygin¹, A.A. Nikitina¹, V.D. Belov¹, E.A. Lazarev²

¹ National University of Science and Technology «MISIS»
4 Leninskiy Prosp., Moscow, 119049, Russia

² PJSC “UEC-Kuznetsov”
29 Zavodskoe Shosse, Samara, 443009, Russia

✉ Viacheslav E. Bazhenov (V.E.Bazhenov@gmail.com)

Abstract: The utilization of computer simulation software for casting process simulation is becoming essential in the advancement of casting technology in aviation and other high-tech engineering fields. With the increase in the number of computational cores in modern CPUs, the use of multi-threaded computations is becoming increasingly relevant. In this study, the efficiency of multi-threaded computations in modeling casting processes was evaluated using finite element method casting simulation software ProCast and PolygonSoft, which utilize parallel computing architectures with distributed (DMP) and shared (SMP) memory, respectively. Computations were performed on Intel and AMD-based computers, varying the number of computational threads from 4 to 32. The calculation efficiency was evaluated by measuring the calculation speed increase in the filling and solidification of GP25 castings made of ML10 alloy, as well as the complex task of filling and solidification modeling nickel superalloy casing castings with radiation heat transfer simulation. The results indicate that the minimum computation time in ProCast software is observed when using 16 computational threads. This pattern holds true for both computing systems (Intel and AMD processors), and increasing the number of threads beyond this point does not make a practical difference. The performance decrease in this scenario can be attributed to the low-performance energy-efficient cores in systems based on Intel processors or the decrease in core frequency and full loading of physical cores in systems based on AMD processors. Multi-threading the modeling task in PolygonSoft software is less efficient than in ProCast, which is a result of the shared-memory architecture used in PolygonSoft. Despite the significant difference in parallel efficiency, the task of GP25 casting solidification in both PolygonSoft and ProCast is solved in a time close enough to be considered sufficient.

Keywords: casting simulation, multithreaded computing, ProCast, PolygonSoft, SMP, DMP.

Acknowledgments: This research received financial support from the Ministry of Science and Higher Education in the Russian Federation (Agreement No. 075-11-2022-023 from 06 April 2022) under the program “Scientific and technological development of the Russian Federation” according to governmental decree No. 218 dated 9 April 2010.

For citation: Bazhenov V.E., Koltygin A.V., Nikitina A.A., Belov V.D., Lazarev E.A. The efficiency of multithreaded computing in casting simulation software. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):38–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-38-53>

Введение

Развитие компьютерных технологий привело к применению математического моделирования в различных областях техники и технологии, в том числе и литейном производстве. Разработано множество систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), помогающих успешно решать задачи, с которыми технологи-литейщики сталкиваются в повседневной практике. Сегодня математическое моделирование является обязательным этапом разработки литейной технологии, особенно в авиации и других наукоемких областях техники, способствуя уменьшению затрат на стадии подготовки производства.

Современные системы инженерного анализа (CAE — computer-aided engineering), и СКМ ЛП в том числе, поддерживают многопоточные вы-

числения, что позволяет значительно снизить длительность расчетов. На начальном этапе распараллеливание вычислительной задачи осуществлялось с помощью распределенных вычислений, где «виртуальный суперкомпьютер» представлен в виде кластеров, соединенных посредством локальной сети (Grid computing, от английского grid — сеть). Сейчас же в большей степени используются облачные вычисления, реализуемые на удаленных суперкомпьютерах, или, гораздо чаще, вычисления на многоядерных пользовательских системах [1]. Это стало возможно благодаря прогрессу в области компьютерных наук, в частности за счет разработки все более эффективных процессоров, где применяются многоядерные вычислительные блоки [2]. Также интересным является направление, связанное с вычислениями на графических

процессорах, но для СКМ ЛП оно в данный момент не развито [3–5].

Традиционно параллельные вычисления можно разделить на два типа по аппаратной реализации: архитектуры с использованием распределенной памяти (DMP — distributed memory processing), где для каждого вычислительного ядра выделяется свой объем памяти, и архитектуры с общей памятью (SMP — shared memory processing), где все ядра имеют доступ к одной и той же общей памяти (рис. 1) [4; 6]. Управление передачей данных между вычислительными узлами осуществляется с помощью интерфейса передачи сообщений (MPI — message passing interface) [7].

Сравнение архитектур SMP и DMP показывает, что последняя (DMP) более эффективна. Так, в работе [8] оценивали эффективность параллельных вычислений задачи моделирования псевдокипящего слоя. При реализации архитектуры SMP прирост скорости для 32 вычислительных потоков в сравнении с одним потоком оказался 14-кратным, в то время как DMP-архитектура позволила получить в аналогичных условиях 27-кратный прирост, что очень близко к теоретически возможному значению, равному 32.

Чаще всего суммарное увеличение скорости вычислений меньше, чем сумма производительности отдельных ядер [9]. В программе моделирования процессов сварки и термообработки SYSWeld (ESI Group) DMP-архитектура позволила при использовании 8 потоков получить 5-кратное повышение скорости расчета [10]. Но при дальнейшем увеличении числа потоков эффективность распараллеливания задачи снизилась. Так, в случае

32 потоков прирост производительности составил всего 9 крат, и она оказалась практически в 4 раза меньше теоретически возможной. В работе [11] с помощью программного обеспечения для инженерного моделирования ANSYS (ANSYS, Inc.) моделировали литые пластмассы с использованием от 1 до 4 вычислительных потоков. Повышение производительности составило 1,5–2,1 крат для двух потоков и 3,1–3,4 крат — для четырех. При решении различных задач моделирования в ANSYS 17 с помощью различного количества потоков (до 28) было показано, что для большинства рассмотренных задач рост производительности происходит до момента участия 16 потоков [12]. Дальнейшее увеличение числа потоков практически никак не влияет на производительность, а в некоторых задачах даже приводит к ее снижению. В целом полученный прирост производительности далек от теоретически возможного, так как в среднем не превышает 7 крат при использовании 28 потоков. В работе [5] при моделировании в программе для решения задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, а также теплопереноса LS-DYNA (ANSYS, Inc.) было получено 6-кратное повышение скорости расчета при наличии 8 потоков.

Не всегда скорость вычислений определяется производительностью процессора и количеством вычислительных потоков. В работе [12] показано, что при замене жесткого диска HDD на твердотельный накопитель SATA SSD наблюдается 4-кратный прирост производительности, а с применением более быстрого NVME SSD-накопителя — 7-кратный. Увеличение объема оперативной памяти также способствует приросту производи-

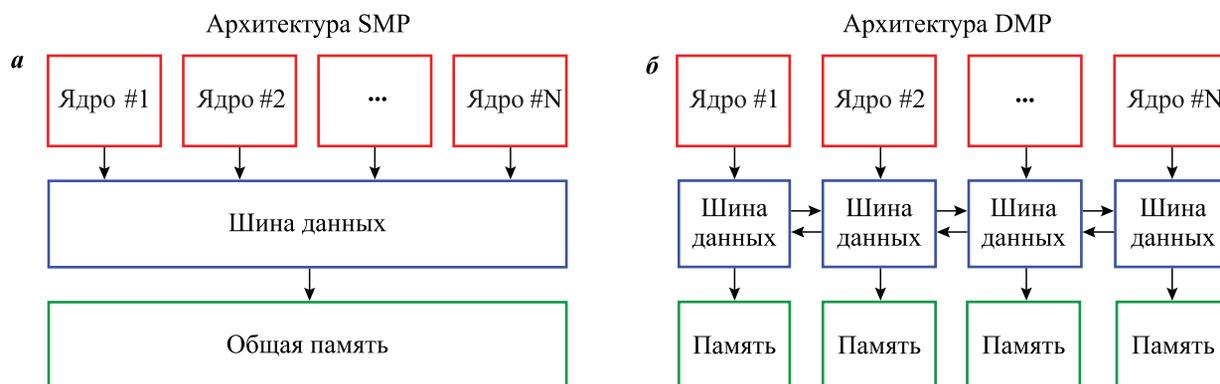


Рис. 1. Архитектуры параллельных вычислений по принципу SMP (а) и DMP (б)

Fig. 1. Schemes of parallel computing based on the SMP (a) and DMP (б) architectures

тельности, но не столь значительному. Данные по влиянию количества элементов в расчетной сетке на повышение скорости расчета неоднозначны [11].

Есть примеры осуществления параллельных расчетов и в СКМ ЛП. Так, в работе [13] с помощью компьютерных кластеров, соединенных с помощью локальной сети, решалась задача моделирования процесса непрерывного литья слитков с использованием программы «ProCast» (ESI Group). Было установлено, что размер сетки не оказывает значительного влияния на эффективность распараллеливания расчетов. Основываясь на результатах, касающихся эффективности организации параллельных вычислений, показано, что решатель «ProCAST» имеет низкие затраты вычислительных мощностей на связь и синхронизацию вычислительных потоков, поскольку его эффективность для 8 вычислительных потоков падает всего до 70 % от теоретически возможного по сравнению с однопоточным вычислением. В работе [2] также моделировали непрерывную разливку слитка в программе «ProCast 2013.5». Применяли как распределенные вычисления по сети, так и облачную вычислительную платформу. Было показано, что использование 2, 4 и 8 потоков позволило снизить время расчета соответственно на 71, 219 и 421 % в сравнении с однопоточным вариантом расчета. То есть с увеличением числа потоков прирост производительности снижается. Авторы [2] указывают, что это вызвано растущими затратами на связь, возникающими из-за необходимости обмена информацией между отдельными процессами решателя.

Таким образом, распараллеливание расчетов, в том числе при решении задач в СКМ ЛП, позволяет значительно повысить их эффективность путем снижения затрачиваемого на них времени. К сожалению, работы [2] и [13] были написаны в 2014–2015 гг., и на сегодняшний день возможности параллельных вычислений значительно выросли за счет появления многоядерных процессоров, способных работать на 32 и более потоках.

При моделировании литейных процессов наиболее часто применяют следующие методы численного решения: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод конечных объемов (МКО). МКР (а также МКО) существенно уступает МКЭ по адекватности (достоверности) решения, требуемым ресурсам вычислительной техники, скорости расчетов, возможности эффективно организовать анализ решения после расчетов [14]. В связи с этим в данной работе ис-

пользовали СКМ ЛП, где для решения задачи моделирования применяется МКЭ.

Целью настоящей работы являлся сравнительный анализ эффективности многопоточных вычислений при моделировании литейных процессов с помощью СКМ ЛП «ProCast» [15; 16] и «ПолигонСофт» [17–19], использующих МКЭ и архитектуры параллельных расчетов DMP и SMP соответственно [13].

Материалы и методика исследования

Моделирование процессов заполнения и затвердевания производили в системах компьютерного моделирования литейных процессов «ProCast 2022» (ESI Group, Франция) и «ПолигонСофт 2022» (СиСофт, Россия). Определяли время выполнения задачи моделирования, варьируя количество расчетных потоков. В СКМ ЛП «ProCast» для расчета заполнения и затвердевания используется метод конечных элементов. При расчете затвердевания теплопередача вычисляется с помощью уравнения теплопроводности Фурье с учетом выделения теплоты кристаллизации. Расчет заполнения формы расплавом происходит с помощью уравнения Навье—Стокса. При расчете заполнения применяется ньютоновская модель вязкости с алгоритмом движения свободной поверхности, определяемым импульсом, учитывающая сохранение массы [20]. Дополнительная информация и уравнения представлены в работах [21–23]. В СКМ ЛП «ПолигонСофт» расчет затвердевания происходит также с использованием метода конечных элементов и решения уравнения Фурье [24].

Вычисления производили на двух компьютерах, первый из которых был собран на базе платформы от компании «Intel» (США), а второй — на базе платформы от компании «AMD» (США). Характеристики компьютеров представлены в табл. 1. Количество расчетных потоков для системы на базе платформы «Intel» задавали равным 4, 8, 12, 16, 20 и 24, а для системы на платформе от «AMD» — 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 и 32. Во время решения задач моделирования контролировали температуру процессоров — она была ниже предельной, и троттлинга (сброса частоты работы процессора при его перегреве) не наблюдалось. При работе компьютера часть вычислительных ресурсов расходуется на работу операционной системы (ОС) и фоновых программ. Предполагается, что для используемых в работе компьютеров влияние ОС незначительно, так как процессоры имеют большое число вычис-

Таблица 1. Комплектуемые, используемые при сборке компьютеров для моделирования

Table 1. Hardware of computers used for simulation

Наименование	Система на платформе «Intel»	Система на платформе «AMD»
Процессор	Intel Core I9 12900KF (16 ядер, 24 потока)	AMD Ryzen 9 5950X (16 ядер, 32 потока)
Материнская плата	Gygabyte Gaming X (LGA1700, Z690)	MSI MAG Torpedo (AM4, X570)
Оперативная память	Kingston DIMM DDR5 5200 МГц, CL40, 64 Гб (2 планки)	Kingston DIMM DDR4, 3600 МГц, CL18, 64 Гб (2 планки)
Система охлаждения	Система жидкостного охлаждения NZXT Kraken X73	Система воздушного охлаждения ID-Cooling SE-207 XT
Твердотельный накопитель	Samsung 980 Pro, M.2 NVME, 1000 Гб	Samsung 970 EVO, M.2 NVME, 500 Гб

лительных ядер, объем оперативной памяти для работы ОС избыточен и, что немаловажно, система работает на быстрых SSD M.2 NVME твердотельных накопителях. Также во время проведения расчетов на компьютерах не запускали сторонних приложений, чтобы минимизировать их влияние на время выполнения расчетов.

Большая часть вычислений производилась для отливки «ГП25», изготавливаемой из магниевого сплава МЛ10 в формах из холоднотвердеющей смеси на фурановой основе с чугунными холодильниками. Отливка представляет собой тонкостенную корпусную деталь, ее конфигурация представлена в работе [25]. Теплофизические свойства сплава МЛ10 рассчитывали с помощью термодинамической базы программы «ProCast» для условий неравновесной кристаллизации по модели Шейля—Гулливера, а свойства чугунных холодильников брали из базы данных программы «ProCast». Теплофизические характеристики холоднотвердеющей смеси были взяты из работы [26], коэффициент теплопередачи между отливкой и формой — из работы [27], а между отливкой и холодильниками — из работы [28]. Время заполнения формы металлом было задано равным 40 с. Температура заливки расплава и температура формы составляли 720 и 20 °С соответственно. Время выполнения задачи моделирования заполнения формы расплавом и задачи моделирования затвердевания отливки определяли по отдельности, так как в первом случае количество задействованных элементов расчетной сетки меняется по ходу процесса заполнения, а во втором — является постоянным. Предположительно, это может влиять на длительность выполнения расчета при различном числе задействованных потоков.

Моделировали заполнение и затвердевание трех крупногабаритных корпусных отливок (диа-

метром от 705 до 1136 мм) из никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ в керамических формах методом литья по выплавляемым моделям. В данном случае процесс расчета был многостадийным, включающим в себя охлаждение литейного блока в печи перед заливкой, заливку расплава в форму и последующее охлаждение. Также в процессе расчета учитывался радиационный теплообмен. Данные отливки моделировали с целью определения эффективности распараллеливания сложной многостадийной задачи моделирования. Теплофизические свойства сплава ВЖЛ14Н-ВИ рассчитывали с помощью термодинамической базы программы «ProCast» для условий неравновесной кристаллизации по модели Шейля—Гулливера. Теплофизические характеристики керамики, из которой изготавливалась форма, стальных элементов конструкции печи, утеплителя, а также подушки, на которую устанавливалась форма, были взяты из базы данных материалов программы «ProCast». Граничные условия также брали из базы данных этой программы, используя настройки (Workflow) для процесса литья по выплавляемым моделям. Температура заливки расплава и начальная температура формы составляли 1450 и 950 °С соответственно.

Расчетную сетку генерировали в генераторе сеток «Visual Mesh» (модуль программы «ProCast»). Эта же сетка использовалась и для моделирования в программе «ПолигонСофт». Для отливки ГП25 генерировали сетку с различными заданными расстояниями между опорными точками, используемыми при генерации 2D-сетки. Эти расстояния, которые обычно называют размером расчетного элемента, были заданы равными 3, 4, 5, 6, 8 и 10 мм. Расчетные сетки, построенные с такими размерами расчетных элементов, далее будут обозначаться L3, L4, L5, L6, L8 и L10 соответственно. При этом

Таблица 2. Характеристики сеточных моделей, использованных для моделирования

Table 2. The mesh parameters used for simulation

Отливка	Размер элемента сетки, заданный при ее генерации, мм			Количество расчетных 3D-элементов, млн шт.
	Отливка	Прибыль	Форма	
ГП25 (L10)	10	20	50	0,73
ГП25 (L8)	8	16	40	0,98
ГП25 (L6)	6	12	30	1,62
ГП25 (L5)	5	10	25	2,35
ГП25 (L4)	4	8	20	3,82
ГП25 (L3)	3	6	15	7,37
Корпус 1	3–70	3–70	3–70	7,32
Корпус 2	3–70	3–70	3–70	3,52
Корпус 3	3–70	3–70	3–70	4,94

для прибыли и формы размер элемента отливки увеличивали в 2 и 5 раз соответственно (см. табл. 2). Таким образом, для сеток размерами L3–L10 количество расчетных тетраэдральных элементов составило от 7,37 до 0,73 млн элементов.

Что же касается расчетной сетки для крупногабаритных корпусных отливок из никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ, то размер элементов варьировался от 3 мм для отливки до 70 мм для пространства печи.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены время расчета заполнения отливки ГП25 в программе «ProCast» на платформах «Intel» и «AMD» и прирост скорости расчета в процентах в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете. Результаты показаны для элементов расчетной сетки размером L3–L10.

При использовании компьютера на платформе «Intel» (рис. 2, а) можно видеть, что кривая времени расчета имеет минимум, который наблюдается для всех использованных расчетных сеток, независимо от количества расчетных элементов в них. Минимальное время расчета отмечено в случае 16 потоков. Дальнейшее расширение числа расчетных потоков до 20 и 24 не только не приводит к снижению времени расчета, но даже увеличивает его. Оно повышается также при возрастании числа элементов в расчетной сетке.

Прирост скорости расчета, представленный на рис. 2, б, позволяет судить о том, что при использовании 8 потоков вместо 4 он составляет 66–77 %,

а для 16 потоков — равен 144–172 %. В большинстве случаев больший прирост производительности наблюдается для сетки с меньшим размером расчетных элементов и большим их количеством соответственно. Штрихпунктирная линия на графике показывает максимальный теоретический прирост производительности, как если бы увеличение производительности при использовании N расчетных потоков было бы равно производительности одного потока, умноженной на N . Таким образом, максимальное теоретическое повышение производительности в случае 8 и 16 потоков должно составлять 100 и 300 % соответственно. Можно видеть, что с увеличением числа расчетных потоков отклонение прироста производительности от теоретически возможного становится все больше, а при их количестве выше 16 (20 и 24) происходит снижение производительности.

С одной стороны, уменьшение эффективности расчета при повышении числа потоков наблюдалось и в других работах для расчетов в совершенно различных программах [2; 5; 8; 10–13], но с другой стороны, проявление этого обстоятельства после порога в 16 расчетных потоков выглядит несколько странно. Чтобы понять возможные причины снижения производительности при использовании более чем 16 расчетных потоков, следует рассмотреть особенности применяемого процессора «Intel I9 12900KF». Известно, что в этом процессоре имеются 8 высокопроизводительных ядер (обозначаются P, от слова performance — производительный) и 8 энергоэффективных ядер (обозначаются E, от слова efficient — эффективный). Ядра P, в свою очередь, способны делить расчет на 2 потока, и таким обра-

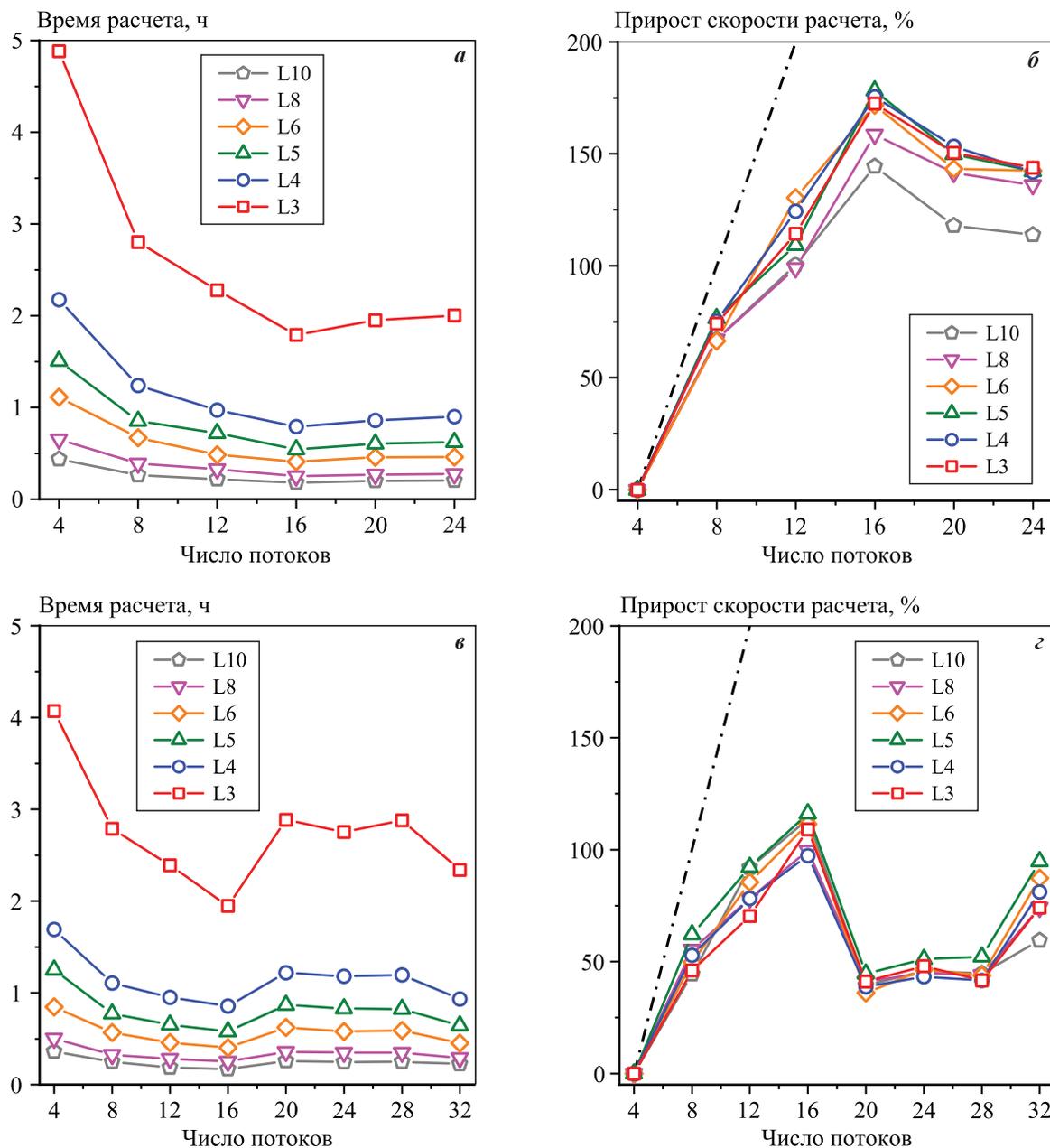


Рис. 2. Длительность расчета заливки отливки «ГП25» в программе «ProCast» (а, в) и прирост скорости расчета (б, з) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (а, б) и «AMD» (в, з) и расчетных сеток L3–L10 (см. табл. 2)

Fig. 2. The calculation time of GP25 casting filling in ProCast (a, v) and the calculation speed growth (б, з) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (a, б) and AMD (в, з) and L3–L10 simulation meshes (see Table 2)

зом суммарно обеспечивается 16 P и 8 E потоков. Производительность ядер P значительно больше производительности ядер E.

В табл. 3 представлены количество задействованных логических ядер в зависимости от выбранного числа потоков для расчета и их рабочая частота. Частоту определяли по прошествии

5 мин после запуска задачи. Можно видеть, что в случае 4 расчетных потоков используются как производительные P-ядра, так и малопродуктивные энергоэффективные ядра. Также следует отметить, что даже при расчете с 4 потоками задействуются 12 производительных логических ядер и 7 энергоэффективных, т.е. большинство ядер. Это

Таблица 3. Задействованное в расчете количество потоков, загрузка ядер и частота

Table 3. The number of threads involved in the calculation, cores load and frequency

Количество потоков	Intel					AMD				
	Ядра P		Ядра E		Частота ядер P/E, ГГц	CCX #0		CCX #1		Частота ядер, ГГц
	Кол-во (16 макс.)	Загрузка, %	Кол-во (8 макс.)	Загрузка, %		Кол-во (16 макс.)	Загрузка, %	Кол-во (16 макс.)	Загрузка, %	
4	12	13	7	25	4,9–5,0 / 3,7–3,9	16	13	11	13	4,63
8	9	36	5	23	4,9 / 3,7	16	26	14	25	4,58
12	11	49	8	46	4,9 / 3,7	16	51	8	25	4,41
16	16	100	0	0	4,9 / 3,7–3,9	16	53	16	51	4,30
20	16	100	4	50	4,9 / 3,7	16	100	4	26	4,42
24	16	100	8	100	4,9 / 3,7	16	100	8	52	4,31
28	–	–	–	–	–	16	100	12	76	4,19
32	–	–	–	–	–	16	100	16	100	4,08

реализуется путем переброски задачи между логическими ядрами, так как физическое P-ядро состоит из 2 логических ядер. Только при использовании 4 расчетных потоков частота отдельных физических ядер поднимается до 5 и 3,9 ГГц (для ядер P и E соответственно). Именно с этим может быть связан высокий и достаточно близкий к теоретически возможному прирост производительности в случае небольшого числа расчетных потоков. В то же время следует отметить, что применение в расчете энергоэффективных ядер является нецелесообразным, так как их производительность ниже, чем у производительных ядер, а значит, после распределения узлов сетки между ядрами шаг расчета будет выполнен быстрее на производительных ядрах и они будут находиться в ожидании выполнения расчетов на энергоэффективных ядрах.

При использовании 8 и более расчетных потоков частоты ядер фиксируются на уровне 4,9 и 3,7 ГГц соответственно для P и E ядер. Можно видеть, что число задействованных ядер меняется достаточно произвольно, но в целом их загрузка растет. Интерес представляет решение задачи с выбором 16 потоков, так как в этом случае нагружаются только производительные P-ядра. При этом режиме работы производительность является максимальной (см. рис. 2, а, б). Дальнейшее увеличение числа потоков приводит к повышению длительности расчета, что связано как с использованием энергоэффективных E-ядер, так и с отсутствием переброски задач между логическими ядрами. Например, при 20-поточном расчете загрузка энергоэффективных логических ядер составляет 50 %. При этом работают именно

4 энергоэффективных ядра из 8, загрузка остальных энергоэффективных ядер составляет 0 %.

В случае использования компьютера на платформе «AMD» (см. рис. 2, в) можно видеть, что кривая, показывающая время расчета в зависимости от числа потоков, так же, как и в случае применения системы на платформе «Intel», имеет минимум при числе потоков 16. Интересно то, что при различной архитектуре процессоров максимальная производительность в обоих случаях достигается именно при реализации процесса моделирования на 16 потоках. Дальнейшее увеличение числа расчетных потоков более 20 приводит к катастрофическому росту времени расчета. Так, например, длительность расчета для 8 потоков оказалась меньше, чем при 20 потоках.

Прирост скорости расчета для системы на базе процессора «AMD» представлен на рис. 2, г. Можно видеть, что при использовании 8 потоков вместо 4 он составляет 44–62 %, а в случае 16 потоков — равен 97–116 %. То есть для системы на процессоре «AMD», в сравнении с системой «Intel», прирост производительности при увеличении числа потоков значительно ниже. Какой-то взаимосвязи между приростом скорости расчета и размером сетки найти не удалось. С увеличением числа расчетных потоков график прироста скорости расчета все больше отклоняется от штрихпунктирной линии, показывающей максимальный теоретический прирост производительности. При повышении количества расчетных потоков до 20 и более наблюдается значительное снижение производительности. Какой-то взаимосвязи между приростом скорости расчета и размером сетки найти не удалось.

Архитектура процессора AMD 5950X представляет собой 2 комплекса ядер ССХ (core complex), каждый из которых содержит 8 физических (16 логических) ядер (в табл. 3 они обозначены ССХ #0 и ССХ #1). В этом есть некая схожесть с рассмотренным ранее процессором «Intel», а именно наличие двух отдельных комплексов ядер. Но в отличие от системы «Intel», где есть комплекс производительных и энергоэффективных ядер, комплексы в процессоре от «AMD» идентичны.

В табл. 3 представлено количество задействованных логических ядер в зависимости от выбранного числа потоков для расчета при использовании системы на процессоре «AMD». Можно видеть, что в случае 4 расчетных потоков применяются оба ССХ-комплекса и, как и в случае процессора «Intel», задействуется большинство логических ядер вследствие переброски задачи между ними. За счет этого физические ядра могут работать на достаточно высокой частоте 4,63 ГГц. Здесь и далее речь идет о средней частоте, так как для процессора от «AMD» частота ядер во время расчета изменяется в значительных пределах. При использовании 8 и 12 потоков частота снижается до 4,58 и 4,41 ГГц соответственно, что сказывается на уменьшении эффективности параллельного расчета. Также можно видеть, что при 12 потоках появляется неравномерность распределения нагрузки между ССХ-комплексами, что также может приводить к снижению скорости расчета. Для режима с 16 потоками и наблюдаемой максимальной производительностью характерна 50 %-ная загрузка ССХ-комплексов с одновременным использованием всех имеющихся логических ядер. Средняя частота при этом уменьшается до 4,3 ГГц. При увеличении числа потоков до 20 заметна явная асимметрия в нагружении ССХ-блоков. Первый загружен на 100 %, что не дает возможности перебрасывать задачи между логическими ядрами, а второй загружен всего на 25 %. Также можно видеть, что несмотря на неполную загруженность комплекса ССХ #1 переброска задач между логическими ядрами не происходит. При этом средняя частота даже немного возрастает в сравнении с вариантом расчета, где использовано 16 потоков.

Дальнейшее увеличение числа потоков приводит к снижению средней частоты процессора, которая при использовании всех потоков уменьшается до 4,08 ГГц. Таким образом, провал в производительности при использовании 20 и более потоков связан с неравномерным распределением нагрузки между ССХ-комплексами и снижением частоты ядер процессора. При этом снижается

эффективность переброски задач между логическими ядрами, так как достигается предел по физическим ядрам, которых в процессоре всего 16. Также одной из возможных причин может быть кэш (внутренняя быстрая память) процессора. Если одно физическое ядро выполняет вычисления для двух потоков, кэш для этих потоков общий, и при большом объеме команд и данных он может не содержать нужной информации, что увеличивает число обращений к оперативной памяти.

На рис. 3 показано время расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ProCast» на платформах «Intel» и «AMD», а также прирост скорости расчета в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете. Можно видеть, что закономерности изменения длительности расчета и прироста скорости в этом случае такие же, как и при расчете заполнения. Единственное отличие заключается в том, что само время расчета затвердевания меньше.

Прирост скорости расчета при увеличении числа потоков с применением платформы «Intel» представлен на рис. 3, б. В случае 8 потоков вместо 4 он составляет 73–90 %, а для 16 потоков вместо 4 прирост равен 182–197 %. То есть для задачи затвердевания использование многопоточности является немного более эффективным, чем для задачи заполнения. Аналогичный результат наблюдается и при решении задачи с помощью компьютера на базе процессора от «AMD». Это может быть связано с тем, что в задаче затвердевания распределение узлов между потоками постоянно, в отличие от задачи заполнения с расходом части процессорного времени на перераспределение узлов между потоками.

На рис. 4 показано время расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ПолигонСофт» с помощью компьютера на платформе «Intel», а также прирост скорости расчета в зависимости от количества задействованных потоков для расчетных сеток L3–L10.

С увеличением числа потоков длительность расчета уменьшается и ее минимум наблюдается при использовании 24 потоков. Но в то же время хорошо видно, что чем больше потоков задействовано, тем меньше прирост скорости расчета (рис. 4, б), который составляет 23–38 % в случае 8 потоков вместо 4 и 34–65 % — для 24 потоков. Таким образом, повышение числа расчетных потоков больше 8 практически не имеет смысла, так как прирост производительности при этом минимален. Также можно видеть, что с уменьшением размера сетки и увеличением числа расчетных

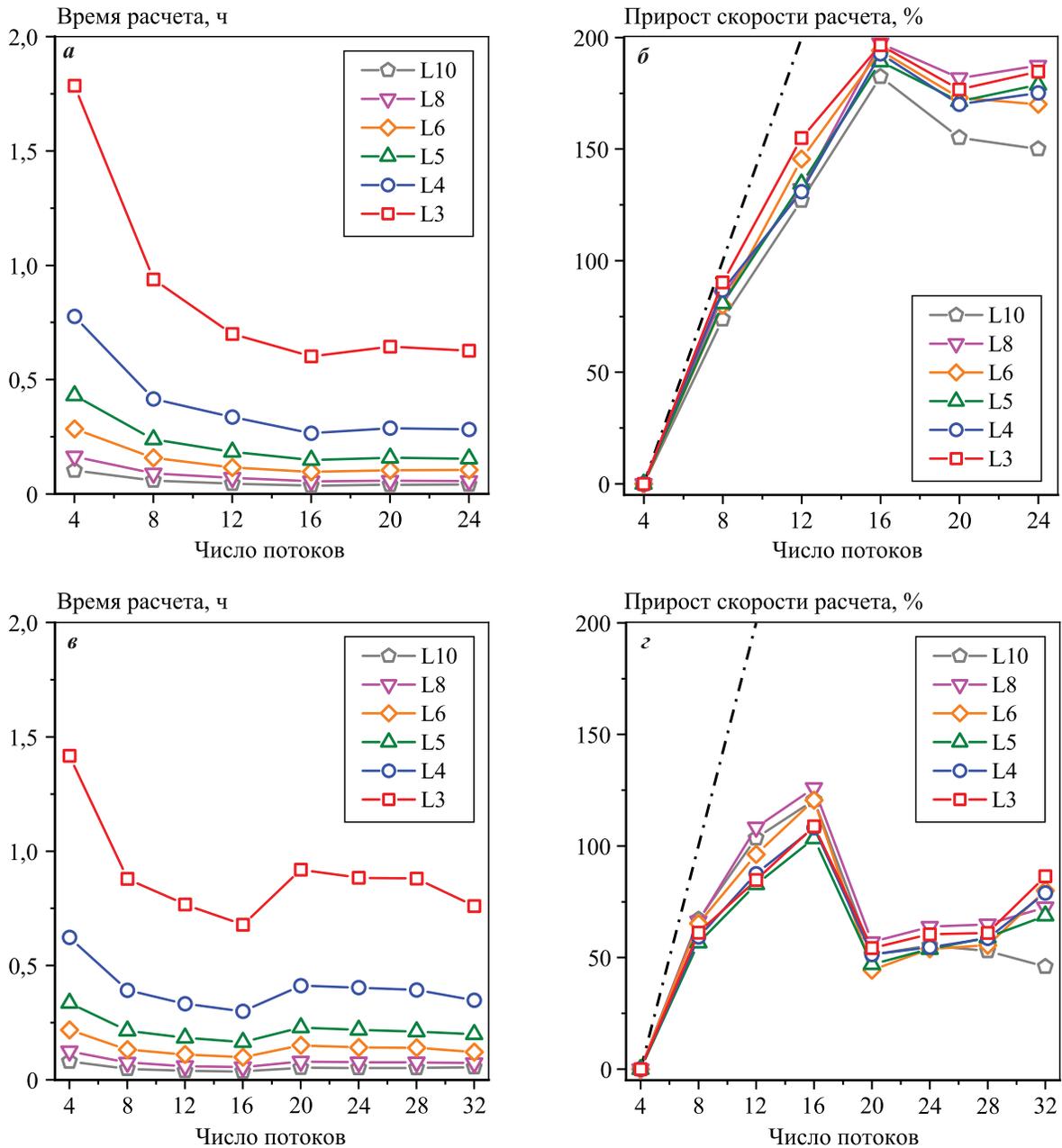


Рис. 3. Длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ProCast» (а, в) и прирост скорости расчета (б, з) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (а, б) и «AMD» (в, з) и варьировании размера элементов расчетных сеток L3–L10 (см. табл. 2)

Fig. 3. The calculation time of GP25 casting solidification in ProCast (a, в) and the calculation speed growth (б, з) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (a, б) and AMD (в, з) and L3–L10 simulation meshes (see Table 2)

элементов соответственно наблюдается почти двукратный прирост производительности.

Как и в случае с программой «ProCast», необходимо разобраться, насколько загружен процессор, чтобы понять возможные причины снижения производительности и неэффективного распараллеливания задачи моделирования. К сожалению,

понять, как именно ядра задействуются при решении задачи с различным количеством потоков, практически невозможно, так как СКМ ЛП «ПолигонСофт» использует архитектуру SMP и в менеджере задач отображается один единственный процесс вне зависимости от числа задействованных потоков. Единственная доступная инфор-

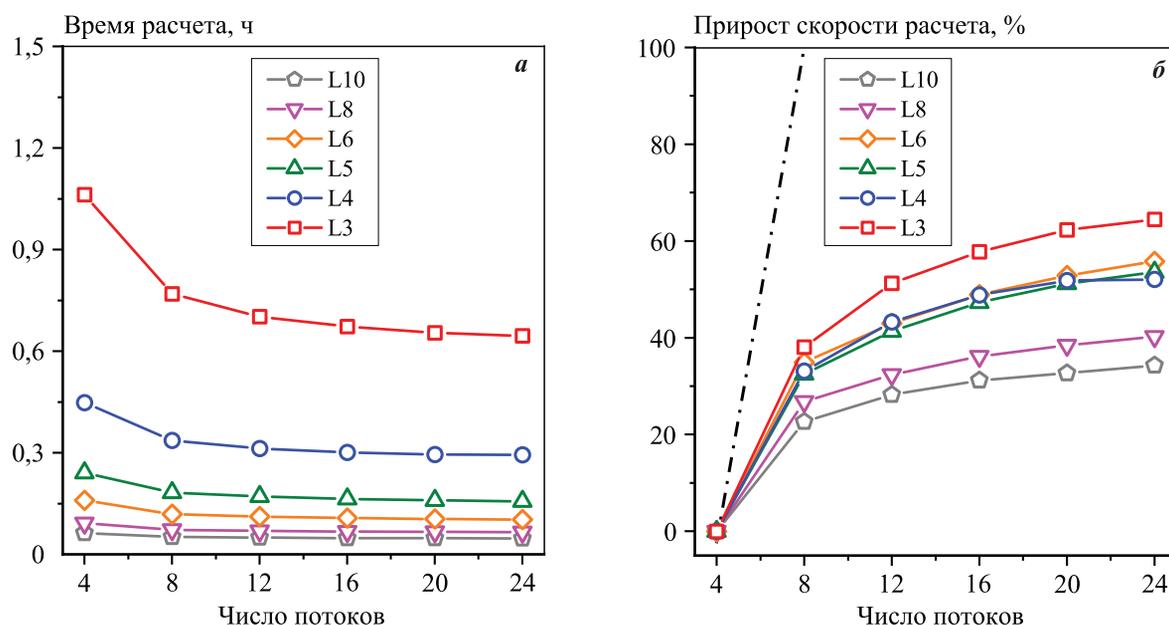


Рис. 4. Длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ПолигонСофт» (а) и прирост скорости расчета (б) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютера на базе платформы «Intel» и варьировании размера элементов расчетных сеток L3–L10 (см. табл. 2)

Fig. 4. The calculation time of GP25 casting solidification in PoligonSoft software (a) and the calculation speed growth (b) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computer based on Intel platform and L3–L10 simulation meshes (see Table 2)

мация — загрузка логических ядер процессора этим процессом в процентах для различного типа ядер (P и E). В случае 4 потоков загружены только P-ядра, и эта загрузка меняется в пределах 10–22 %, причем следует отметить, что 22 % — это пиковое значение, которое достигается раз в несколько секунд. Большую часть времени загрузка ближе к 10 %. При увеличении числа потоков до 12 загружены как P-ядра (20–37 %), так и E-ядра (10–21 %). При максимальном числе потоков загрузка P и E ядер одинакова и составляет 20–60 %. Очевидно, что при проведении расчета затвердевания в программе «ПолигонСофт» процессор сильно недогружен — причиной этого является использование менее эффективной архитектуры распараллеливания с общей памятью (SMP) вместо применяемой в программе «ProCast» DMP-архитектуры, где каждому логическому ядру выделяется определенный объем памяти.

На рис. 5 показаны длительность расчета задачи заполнения и затвердевания отливок «Корпус» (см. табл. 2) в программе «ProCast» и прирост скорости расчета в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформы от «Intel» и «AMD». Отличие данного расчета заключается в

том, что здесь рассчитывалось охлаждение формы перед заливкой металла, а также учитывался радиационный теплообмен. Закономерности, отмеченные ранее для отливки «ГП25», также прослеживаются и для отливок «Корпус». Максимальная производительность наблюдается при использовании 16 вычислительных потоков для обеих систем («Intel» и «AMD»). Сравнение платформ показывает, что при выборе 4 потоков расчеты на процессоре «AMD» немного эффективнее, но если число потоков больше 8 — эффективнее система на процессоре «Intel». Скорее всего, более высокая производительность системы на процессоре «Intel» связана с более высокой рабочей частотой производительных ядер, а также применением оперативной памяти стандарта DDR5, а не DDR4, как в компьютере, собранном на платформе от «AMD». Что же касается меньшей производительности системы «Intel» при числе вычислительных потоков, равном 4, то вероятная причина может заключаться в том, что задача в значительной степени решается на малопроизводительных энергоэффективных (E) ядрах (см. табл. 3). При увеличении числа потоков более 8 система на платформе «Intel» начинает в большей степени задействовать производительные ядра, а в системе на «AMD»

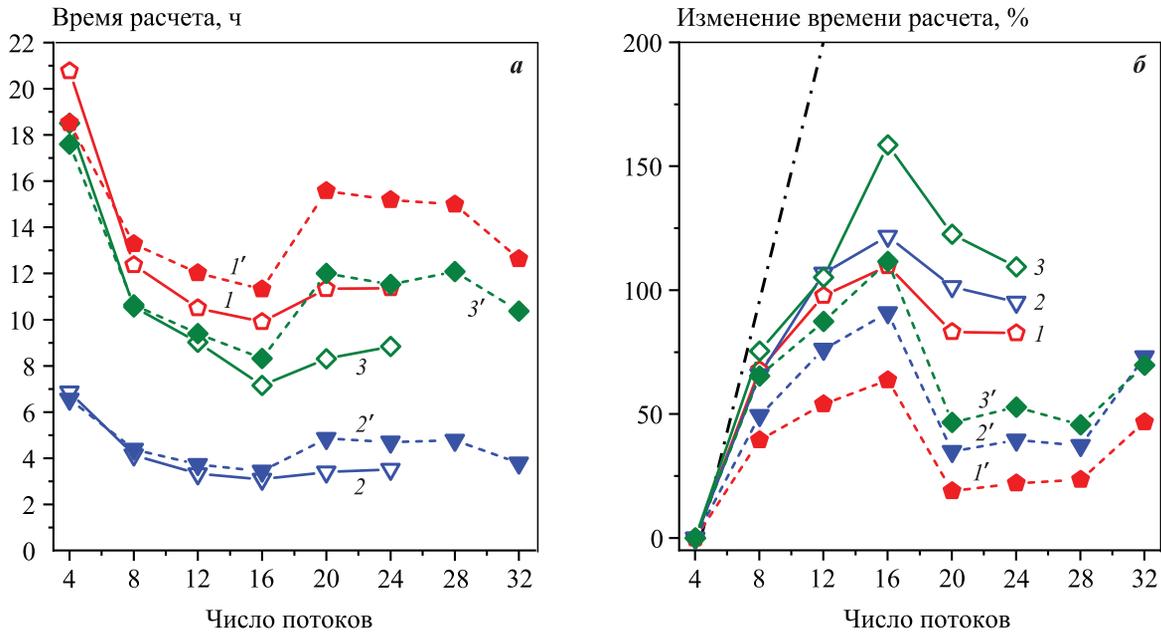


Рис. 5. Длительность расчета заполнения и затвердевания отливок «Корпус» (см. табл. 2) в программе «ProCast» (а) и прирост скорости расчета (б) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (пустые точки 1–3) и «AMD» (закрашенные точки 1'–3') 1, 1', 2, 2', 3, 3' – номера отливок «Корпус»

Fig. 5. The calculation time of “body” castings filling and solidification in ProCast (a) and the calculation speed growth (б) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (open points 1–3) and AMD (filled points 1'–3') 1, 1', 2, 2', 3, 3' – numbers of castings “Body”

происходит постепенное падение частоты работы физических ядер. В расчетах для отливки «ГП25» не удалось увидеть четкого влияния размера сетки на эффективность распараллеливания задачи моделирования. Для отливок «Корпус» зависимость между количеством элементов в сетке и приростом производительности также не прослеживается.

На рис. 6 представлены длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» в программах «ProCast» и «ПолигонСофт» и прирост скорости расчета в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете с помощью компьютеров на базе платформ «Intel» и «AMD». Расчет проводили для сетки L3 с минимальным размером и максимальным количеством элементов (см. табл. 2). При сравнении длительности расчета в СКМ ЛП «ProCast» можно видеть, что, в отличие от результатов для отливок «Корпус», система на процессоре «AMD» эффективнее при использовании 4 и 8 потоков, а при большем числе потоков меньшую длительность расчета обеспечивает система на процессоре «Intel». Возможные причины этой разницы изложены при описании результатов для отливок «Корпус». Но в целом можно сделать вывод

о том, число расчетных потоков, при котором одна система может опережать другую, может меняться в зависимости от задачи. Следует отметить, что задача затвердевания отливки «ГП25» в программе «ПолигонСофт» при малом числе потоков решается быстрее, чем в программе «ProCast». В случае применения 16 потоков задача решается быстрее в программе «ProCast», если используется система на процессоре «Intel».

Следует пояснить, что сравнение скорости расчета в СКМ ЛП «ПолигонСофт» и «ProCast» является лишь оценочным и позволяет сориентировать пользователя в вопросе времени вычислений похожих задач в этих программах. На точность такое сравнение не может претендовать, поскольку алгоритмы расчета и набор получаемых результатов для этих программ не одинаковы. В целом можно сделать вывод о том, что время, затрачиваемое на расчет затвердевания одной и той же отливки в программах СКМ ЛП «ProCast» и «ПолигонСофт», примерно одинаково.

В заключение можно сказать, что, несмотря на снижающуюся эффективность распараллеливания задачи моделирования с увеличением числа

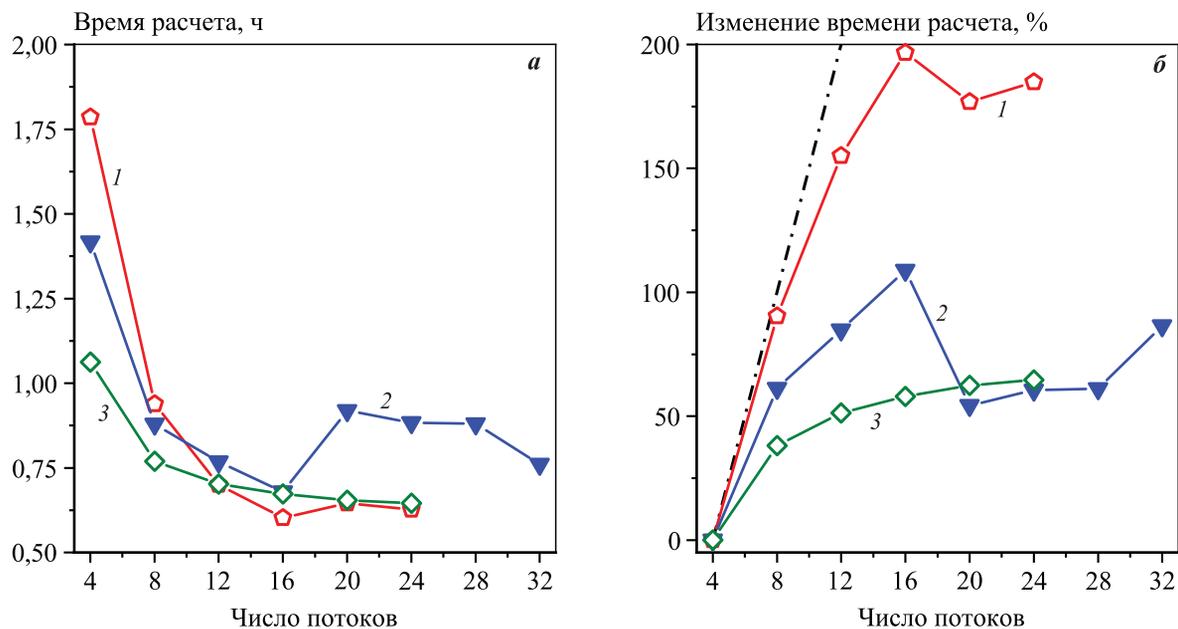


Рис. 6. Длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» (а) и прирост скорости расчета (б) в программах «ProCast» (1, 2) и «ПолигонСофт» (3) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (пустые точки 1, 3) и «AMD» (закрашенные точки 2) и расчетной сетки L3 (см. табл. 2)

Fig. 6. The calculation time of GP25 casting solidification (a) in ProCast (1, 2) and PolygonSoft (3) software and the calculation speed growth (b) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (open points 1, 3) and AMD (filled points 2) and L3 simulation mesh (see Table 2)

расчетных потоков, использование современных процессоров с большим числом логических ядер позволяет значительно сократить время решения задачи моделирования заполнения и затвердевания отливки. Это, в свою очередь, дает возможность технологам на производстве смоделировать процессы заполнения и затвердевания для большего числа вариантов технологии, принять более взвешенное решение по реализуемой технологии литья и снизить затраты и количество брака. Это особенно актуально при моделировании литейных процессов получения крупногабаритных тонкостенных отливок, для которых количество элементов в расчетных сетках и, соответственно, время моделирования очень велико.

Выводы

1. Минимальное время расчета при решении задачи моделирования процесса заполнения и затвердевания отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ProCast» наблюдается при использовании 16 потоков с применением как системы на процессоре «Intel Core I9 12900KF», так и системы на процессоре «AMD Ryzen 9 5950X». При этом (16 потоков вместо 4)

прирост производительности составляет ~180 и 110 % соответственно для систем «Intel» и «AMD».

2. Причины снижения производительности при использовании более 16 потоков связаны с наличием медленных энергоэффективных ядер в процессорах «Intel» и уменьшением частоты ядер для процессора от «AMD». Также для систем на обоих процессорах характерно неравномерное распределение вычислительной задачи между потоками из-за полной загрузки физических ядер.

3. Распараллеливание задачи моделирования отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ПолигонСофт» значительно менее эффективно, чем в СКМ ЛП «ProCast», что связано с реализацией архитектуры SMP в «ПолигонСофт», приводящей к недогрузке логических ядер и, как следствие, к приросту производительности, не превышающему 65 % при использовании 24 потоков вместо 4.

4. Несмотря на значительную разницу в эффективности распараллеливания, задача затвердевания отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ПолигонСофт» и СКМ ЛП «ProCast» решается за достаточно близкое время.

5. Решение более сложной задачи моделирования крупногабаритных корпусных отливок из

никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ в керамических формах в СКМ ЛП «ProCast», включающей в себя охлаждение литейного блока в печи перед заливкой, заливку расплава в форму и последующее охлаждение, с учетом радиационного теплообмена, показало, что эффективность распараллеливания остается на таком же уровне, как и при решении задачи для отливки «ГП25».

Список литературы/References

- Schwiegelshohn U., Badia R.M., Bubak M., Danelutto M., Dustdar S., Gagliardi F., Geiger A., Hluchy L., Kranzlmüller D., Laure E., Priol T., Reinefeld A., Resch M., Reuter A., Rienhoff O., Rüter T., Sloot P., Talia D., Ullmann K., Yahyapour R., von Voigt G. Perspectives on grid computing. *Future Generation Computer Systems*. 2010;26:1104–1115. <https://doi.org/10.1016/j.future.2010.05.010>
- Konopka K., Miłkowska-Piszczyk K., Trebacz L., Falakus J. Improving efficiency of ccs numerical simulations through use of parallel processing. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015;60(1):235–238. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0037>
- Истомин В.А., Шварц Д.Р., Ишханов Е.А., Тихомиров М.Д. Использование бессеточного метода сглаженных частиц при моделировании гидродинамики в СКМ ЛП «ПолигонСофт». *Литейное производство*. 2012;(8):20–22. Istomin V.A., Shvarts D.R., Ishkhanov E.A., Tikhomirov M.D. Using the meshfree smoothed-particles method in the simulation of hydrodynamics in the casting simulation software “PoligonSoft”. *Liteinoe Proizvodstvo*. 2012;(8):20–22 (In Russ.).
- Cai Y., Li G., Wang H., Zheng G., Lin S. Development of parallel explicit finite element sheet forming simulation system based on GPU architecture. *Advances in Engineering Software*. 2012;45:370–379. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.10.014>
- Posey S., Kodiyalam S. Performance benefits of NVIDIA GPUs for LS-DYNA®. In: *8th European LS-DYNA Users Conference* (May 2011). Strasbourg, 2011. P. 1–6.
- Kaplinger B., Wie B., Dearborn D. Efficient parallelization of nonlinear perturbation algorithms for orbit prediction with applications to asteroid deflection and fragmentation. In: *20th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting* (15–17 February 2010). San Diego, 2010. P. 1845–1860.
- Thibault S.E., Holman D., Trapani G., Garcia S. CFD simulation of a quad-rotor UAV with rotors in motion explicitly modeled using an LBM approach with adaptive refinement. In: *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (9–13 January 2017). Grapevine: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. P. 1–16. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0583>
- Pannala S., D’Azevedo E.F., Syamlal M. O’Brien T. Hybrid (OpenMP and MPI) parallelization of MFIx: A multiphase CFD code for modeling fluidized beds. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing (SAC)* (9–12 March 2003). Melbourne: Association for Computing Machinery, 2003. P. 199–206. <https://doi.org/10.1145/952532.952574>
- Tomsich P., Rauber A., Merkl D. ParSOM: Using parallelism to overcome memory latency in self-organizing neural networks. In: *High Performance Computing and Networking: Proceedings of the 8th International Conference* (8–10 May 2000). Amsterdam: Springer, 2000. P. 136–145. https://doi.org/10.1007/3-540-45492-6_15
- Биленко Г.А. Общие возможности пакета программ Welding simulation suite. *Металлург*. 2011;(5):28–31. Bilenko G.A. General capabilities of the software package Welding simulation suite. *Metallurgist*. 2011;55(5–6): 323–327. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11015-011-9430-6>
- Yang W.-H., Peng A., Liu L., Hsu D.C. Parallel true 3D CAE with hybrid meshing flexibility for injection molding. In: *Annual Conference of the Society of Plastics Engineers ANTEC 2005* (1–5 May 2005). Boston: Curran Associates Inc., 2005. Vol. 1. P. 56–60.
- Corke G. Workstations for simulation (FEA). URL: <https://develop3d.com/features/workstations-for-simulation-fea-ansys-mechanical-17-0> (accessed: 17.01.2023).
- Trebacz L., Miłkowska-Piszczyk K., Konopka K., Falakus J. Numerical simulation of the continuous casting of steel on a grid platform. In: *eScience on distributed computing infrastructure. Lecture notes in computer science* (Eds. M. Bubak, J. Kitowski, K. Wiatr). Heidelberg: Springer, 2014. Vol. 8500. P. 407–418. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10894-0_29
- Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше — метод конечных элементов или метод конечных разностей? *Литейное производство*. 2002;(5):22–28. Tikhomirov M.D., Komarov I.A. Principles of simulation of casting processes. Which is better, the finite element method or the finite difference method? *Liteinoe Proizvodstvo*. 2002;(5):22–28. (In Russ.).
- Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Тарасевич И.Н., Дудченко А.В. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов. *Металл и литье Украины*. 2010;(5):20–25. Tarasevich N.I., Korniets I.V., Tarasevich I.N., Dudchenko A.V. Comparative analysis of computer simulation

- software for metallurgical and foundry processes. *Metall i Lit'e Ukrainy*. 2010;(5):20–25. (In Russ.).
16. Simulate the complete casting process to reach zero defects with a single tool. URL: <https://www.esi-group.com/products/casting> (accessed: 6.02.2023).
 17. Туришев В. Моделирование литейных процессов: Что выбрать? *CADmaster*. 2005;(2):33–35.
Turishchev V. Simulation of foundry processes: What to choose? *CADmaster*. 2005;(2):33–35. (In Russ.).
 18. Система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт». URL: <https://poligonsoft.ru> (дата обращения: 6.02.2023).
 19. Монастырский А., Тихомиров М. СКМ ЛП «ПолигонСофт» 13.X. Обзор, итоги, планы. *CADmaster*. 2013;(2):44–48.
Monastyrskii A., Tikhomirov M. The casting simulation software “PoligonSoft” 13.X. Overview, results, plans. *CADmaster*. 2013;(2):44–48. (In Russ.).
 20. ESI Group, ProCAST 2010.0 User’s Manual (ESI Group, 2010). URL: https://myesi.esi-group.com/system/files/documentation/ProCAST/2010/ProCAST_20100_UM.pdf (accessed: 12.09.2022).
 21. Yang L., Chai L.H., Liang Y.F., Zhang Y.W., Bao C.L., Liu S.B., Lin J.P. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb–TiAl alloy. *Intermetallics*. 2015;66:149–155.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.07.006>
 22. Lu S., Xiao F., Guo Z., Wang L., Li H., Liao B. Numerical simulation of multilayered multiple metal cast rolls in compound casting process. *Applied Thermal Engineering*. 2016;93:518–528.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.114>
 23. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification. Lausanne: EPFL Press, 2009. 621 p.
 24. Тихомиров М.Д. Основные аспекты решения тепло-
 - вой задачи при моделировании литейных процессов. *Литейное производство*. 1998;(4):30–34.
Tikhomirov M.D. Main aspects of solving the heat transfer problem in the simulation of foundry processes. *Liteinoe Proizvodstvo*. 1998;(4):30–34. (In Russ.).
 25. Колтыгин А.В., Баженов В.Е., Целовальник Ю.В., Белов В.Д., Юдин В.А. Результаты компьютерного моделирования усадочной микропористости в корпусной отливке из сплава МЛ10. *Литейное производство*. 2020;(8):23–27.
Koltygin A.V., Bazhenov V.E., Tseloval'nik Yu.V., Belov V.D., Yudin V.A. Results of computer of shrinkage microporosity simulation in ML10 alloy body casting. *Liteinoe Proizvodstvo*. 2020;(8):23–27. (In Russ.).
 26. Palumbo G., Piglionico V., Piccininni A., Guglielmi P., Sorgente D., Tricarico L. Determination of interfacial heat transfer coefficients in a sand mould casting process using an optimised inverse analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 78:682–694.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.046>
 27. Баженов В.Е., Петрова А.В., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В. Определение коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава МЛ5 (AZ91) и формой из холоднотвердеющей смеси. *Цветные металлы*. 2017;(8):89–96.
Bazhenov V.E., Petrova A.V., Koltygin A.V., Tseloval'nik Yu.V. Determination of the interfacial heat transfer coefficient between AZ91 alloy casting and resin bonded sand mold. *Tsvetnye Metally*. 2017;(8):89–96. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.14>
 28. Bazhenov V.E., Tselovalnik Yu.V., Koltygin A.V., Belov V.D. Investigation of the interfacial heat transfer coefficient at the metal–mold interface during casting of an A356 aluminum alloy and AZ81 magnesium alloy into steel and graphite molds. *International Journal of Metalcasting*. 2021;15(2):625–637.
<https://doi.org/10.1007/s40962-020-00495-2>

Информация об авторах

Вячеслав Евгеньевич Баженов – к.т.н., доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов (ЛТиХОМ) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (НИТУ МИСИС).

<https://orcid.org/0000-0003-3214-1935>

E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Андрей Владимович Колтыгин – к.т.н., доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-8376-0480>

E-mail: misistlp@mail.ru

Information about the authors

Viacheslav E. Bazhenov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of Foundry Technologies and Material Art Working (FT&MAW), National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS).

<https://orcid.org/0000-0003-3214-1935>

E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Andrei V. Koltygin – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-8376-0480>

E-mail: misistlp@mail.ru

Анна Андреевна Никитина – учебный мастер кафедры ЛТИХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-5399-0330>

E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Владимир Дмитриевич Белов – д.т.н., заведующий кафедрой ЛТИХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0003-3607-8144>

E-mail: vdbelov@mail.ru

Евгений Алексеевич Лазарев – главный металлург ПАО «ОДК-Кузнецов».

E-mail: ea.lazarev@uec-kuznetsov.ru

Anna A. Nikitina – Educat. Master, Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-5399-0330>

E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Vladimir D. Belov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0003-3607-8144>

E-mail: vdbelov@mail.ru

Evgenii A. Lazarev – Head Metallurgist of the PJSC “UEC-Kuznetsov”.

E-mail: ea.lazarev@uec-kuznetsov.ru

Вклад авторов

В.Е. Баженов – формирование основной концепции, проведение расчетов, обработка результатов расчетов, написание текста статьи.

А.В. Колтыгин – научное руководство, редактирование текста статьи.

А.А. Никитина – проведение расчетов, обработка результатов расчетов.

В.Д. Белов – общее руководство, редактирование текста статьи.

Е.А. Лазарев – формулировка цели и задачи исследования, обеспечение ресурсами.

Contribution of the authors

V.E. Bazhenov – conceptualization, realization of simulation, analysis of the simulation results, writing of the manuscript.

A.V. Kolygin – scientific guidance, review and editing of the manuscript.

A.A. Nikitina – realization of simulation, analysis of the simulation results.

V.D. Belov – supervision, review and editing of the manuscript.

E.A. Lazarev – formulation of the aims and objectives of the study, provision of resources.

Статья поступила в редакцию 09.02.2023, доработана 22.03.2023, подписана в печать 24.03.2023

The article was submitted 09.02.2023, revised 22.03.2023, accepted for publication 24.03.2023