

ПРЕДИСЛОВИЕ

Анализ данных по дефектным и разрушенным конструкциям, выявленным при эксплуатации кораблей, самолетов и ракет, показывает, что в узлах сопряжений литых деталей имеются различного рода скрытые дефекты: усадочная пористость, утяжини, микро- и субмикроскопические трещины, неметаллические включения, обезуглероженность поверхностного слоя и др., оказывающие существенное влияние на прочность и надежность конструкций при эксплуатации.

Количество, размер и характер распределения дефектов определяется не только многими технологическими факторами, имеющими место при изготовлении деталей, но и их конструкцией, которая оказывает существенное влияние на процессы кристаллизации сплавов и образование микродефектов.

Фундаментальные теоретические исследования и большой практический вклад в повышение прочности литых конструкций, в одну из наиболее сложных проблем, внесли отечественные и зарубежные специалисты.

Однако многочисленные рекомендации по конструированию литых деталей одной из важных проблем как отечественных, так и зарубежных ученых основаны, главным образом, на обобщении производственного опыта изготовления литых конструкций и их эксплуатации. Их рекомендации имеют общий характер, весьма противоречивы и подчас не связаны с конкретной технологией изготовления отливок [1–6]. Такой подход уже не соответствует современному уровню развития науки и техники, является недостаточным основанием для разработки конструкций, обеспечивающих повышение прочностных и снижение массогабаритных характеристик деталей.

Существенное значение для снижения шумности подводных лодок имеет применение для деталей дизелей, компрессоров, насосов и др. конструкционного материала — высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, обладающего высокой демпфирующей способностью. Однако какие-либо рекомендации по конструированию деталей из высокопрочного чугуна в современной литературе отсутствуют, что сдерживает его применение.

Именно поэтому в Научной записке отделения механики и процессов управления Академии наук СССР по прогнозированию основных направлений научных исследований указывалось, что основополагающим направлением современного судостроения в числе других проблем является создание научных основ конструирования литых деталей с целью повышения их прочностных и снижения массогабаритных характеристик. Особо жесткие требования в связи с этим предъявляются к литым деталям турбонаддувочного агрегата для высоконапорных котлов, турбозубчатого агрегата, к литым деталям бустерных, конденсатных, циркуляционных, питательных и других насосов, к литым деталям различных клапанов и кранов. Это требует принципиально нового подхода к конструированию литых деталей на основе тщательного анализа процессов кристаллизации сплавов, выявлению взаимосвязи между конструкцией и дефектностью деталей, более достоверной оценки механических

свойств. В связи с этим решение проблемы повышения прочностных и снижение массогабаритных характеристик литых деталей предлагается на базе создания научно обоснованных рекомендаций по конструированию литых деталей из стали, высокопрочного чугуна, алюминиевых и магниевых сплавов.

Снижение массы и повышение надежности литых деталей является одной из главных задач. Наряду с применением новых сплавов и прогрессивных технологических процессов изготовление отливок, поставленные задачи могут быть решены за счет совершенствования конструкций литых деталей.

Повышение эффективности использования количественного подхода к решению конкретных практических задач литьевого производства, полученного на основе концептуального и инструментального аппаратов новой ветви фундаментальных наук, связанных с развитием теории сложных систем, кибернетики и исследованием операций. Основой научной концепции в этом случае остается понятие «система». Степень зрелости технической науки, как известно, определяется степенью использования количественных методов анализа и синтеза систем. Аппарат системного анализа служит эффективным средством решения двух главных задач литьевого производства: разработки рациональной конструкции литой детали и максимального использования производственного потенциала литьевого цеха.

По данным зарубежных специалистов, размер материальных затрат при производстве отливок на 70–75% определяется уровнем конструкторской проработки, на 12–15% — технологией изготовления и на 12–15% — организацией производства.

Общие принципы конструирования литых деталей глубоко и подробно разработаны еще в 1930–1940 гг. Однако многочисленные рекомендации по конструктивному оформлению элементов литых деталей давно устарели и не соответствуют современному уровню науки и технологии изготовления отливок. Применение устаревших рекомендаций вызывает повышенную материальность создаваемых машин и устройств, снижает их надежность и долговечность.

Металлы и сплавы в деталях имеют различные дефекты, оказывающие существенное влияние на их механические свойства. К ним относятся точечные дефекты (вакансии, межузельные атомы и др.), одномерные дефекты (дислокации), двухмерные дефекты (границы зерен и двойников, дефекты упаковки и др.), трехмерные дефекты (пористость, различные неметаллические включения и т. п.). В последние годы в учении о прочности и пластичности материалов, на основе теории точечных дефектов и теории дислокации, развиваются представления о влиянии дефектов структуры на пластические деформации и разрушения кристаллических твердых тел. Вместе с тем следует отметить, что взаимодействие указанных дефектов (вакансий, дислокаций) между собой, а также с другими дефектами настолько сложны, что современные теории не позволяют с полной определенностью предсказать прочность деталей из новых сплавов. Так, теория дислокации позволяет лишь качественно охарактеризовать процессы деформации, разрушения и упрочнения мате-

риала изделия. Взаимодействие же кристаллов между собой исследовано недостаточно, то же относится и к влиянию размеров изделия, гетерофазности или метастабильности структуры сплавов, пористости, наличию неметаллических включений, к поведению сплавов при эксплуатации различных устройств.

Качество литых деталей определяется их конструкцией и технологией изготовления, которые непрерывно изменяются и совершенствуются. Отсутствие научно обоснованных рекомендаций по конструированию литых деталей из стали, высокопрочного чугуна, алюминиевых и магниевых сплавов является следствием недостаточного внимания к этой проблеме со стороны научных работников и научно-исследовательских коллективов в целом.

Научно-исследовательские работы по конструированию литых деталей из цветных сплавов вообще отсутствуют в современной технической литературе. Поэтому в настоящее время одной из главных проблем, нуждающейся в первоочередной разработке, является создание научных основ конструирования литых деталей и их элементов, обеспечивающих получение высококачественных отливок с минимальной массой и конфигурацией, благоприятной с точки зрения действующих напряжений при эксплуатации, а также положений по оценке прочности и надежности литых деталей.

Одной из важных задач автоматизированного проектирования конструкций литых деталей является учет сложных взаимосвязей между конструкцией литых деталей, их структурой и механическими свойствами. Поиск оптимального решения этой задачи затруднен из-за огромного количества изменяющихся параметров (100–200), характеризующих технологию изготовления, конструкцию и свойства литой детали.

Численное моделирование пока не может дать конкретных данных по количеству, размеру и характеру расположения дефектов, и тем более прогнозировать ожидаемые механические свойства литых деталей. Однако автоматизированное проектирование конструкции литой детали в современных условиях вполне возможно при достаточно обоснованных исходных данных для составления пакета программ. Такими исходными данными при разработке конструкции детали являются величина и характер действующих нагрузок при эксплуатации, толщина стенок, соотношение толщин сопрягаемых стенок, расстояние между вертикальными стенками в Z-образных конструктивных элементах, величина радиусов закруглений во внутренних углах сопряжений и др. Для получения таких исходных данных разработаны методологические основы конструирования элементов литых деталей, заключающиеся в характеристике компонентов исследования, совокупности средств и последовательности исследований, в процессе решения данной проблемы.

Научно обоснованные принципы конструирования элементов литых деталей могут быть получены лишь на базе комплексных исследований процесса кристаллизации сплавов и конструкционных свойств литых деталей. Учет только одного из указанных исследований может привести либо к завышению массы литых деталей, либо к снижению их прочности при эксплуатации. Ком-

плексное исследование процесса кристаллизации сплавов и конструктивных свойств рекомендуется проводить на модельных образцах, включающих конструктивный элемент литой детали.

Количественная взаимосвязь между конструкцией литых деталей, их структурой и механическими свойствами является теоретической основой для конструирования технологичных и надежных деталей. Эта взаимосвязь должна учитывать состав сплава, конкретную технологию изготовления отливок, величину и характер действующих нагрузок при эксплуатации.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУИРОВАНИИ И ПРОЧНОСТИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Основная задача конструктора — создание машины, наиболее полно отвечающей эксплуатационным требованиям и обладающей наиболее высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями. Главными показателями являются надежность, высокая производительность, экономичность, прочность, малый вес, металлоемкость, габариты, энергоемкость, объем и стоимость ремонтных работ; высокий ресурс долговечности; большие межремонтные сроки; высокий моральный ресурс и степень автоматизации; простота и безопасность обслуживания; удобство управления, разборки и сборки. В конструкциях необходимо соблюдать требования технической эстетики.

Принципиальные положения по конструктивному оформлению литых деталей, приведенные в работах [2, 6], как правило, основываются на практических рекомендациях В. М. Андреева [7], В. М. Шестопала [8], Э. А. Сателя [9] и других исследователей.

Однако общие принципы конструирования литых деталей, изложенные в работах [1–9], весьма противоречивы, в основном имеют качественный характер и совершенно не отражают достигнутый уровень научных знаний в области кристаллизации сплавов, их конструкционных свойств, с учетом технологии изготовления деталей.

В работе [2] В. Б. Гокун высказывает весьма интересную мысль, что количественное значение величин соответствующих конструктивных элементов литых деталей, таких как: радиусы закруглений, толщины стенок, размеры ребер жесткости и другое зависят не только от технологии изготовления отливок, но и от характера и величины действующих загрузок. Хотя эта мысль в работе [2] является лишь пожеланием.

Впервые серьезная попытка расчета конструкции отливки на основе термодинамического анализа ее затвердевания была предпринята А. И. Вейником [10]. В этой работе приведены расчетные методы перехода от заданной технологии к свойствам изделия и от заданных свойств к технологии (расчет свойств чугуна, расчет свойств отливок и т. д.). Однако фактически конструкция отливки в этих расчетах не учтена, что и не позволило А. И. Вейнику определить величину и характер расположения различных дефектов, имеющих место в реальной отливке (пористость, трещины, утяжки и др.), оказывающих весьма существенное влияние на ее эксплуатационные и механические свойства литых деталей.

Установление связей между технологией изготовления отливок, ее конструкцией и механическими свойствами — задача чрезвычайно сложная. И, как указывает Г. Ф. Баландин [11], требуемые связи между режимами литья и процессом формирования свойств отливки в рамках тепловой теории можно установить только эмпирически. Г. Ф. Баландин считает [12], что затвердевание металлов и сплавов происходит в результате зарождения и роста кристаллов в ох-

лаждающимся расплаве. От числа, скорости, формы роста кристаллов и их преимущественной ориентировки в теле отливки зависят ее кристаллическое строение и, следовательно, ее важнейшие эксплуатационные и технологические свойства.

Сопоставляя свойства литых деталей, полученных в различных условиях, Г. А. Анисович, В. И. Тутов, В. А. Гринберг [13] показали, что высокая интенсивность охлаждения и хорошие условия для питания фронта затвердевания позволяют получать отливки с повышенными механическими свойствами. То есть условия затвердевания отливки в литейной форме являются одним из основных факторов, предопределяющих механические свойства литой детали. Именно в этот период формируется структура сплава, образуются усадочные дефекты, газовые раковины, внутреннее напряжение и т. п.

Р. Раддл [14], Г. Бишоп и В. Пеллини [15] и другие исследователи считают, что чистые металлы затвердевают с образованием твердого слоя, в то время как сплавы типа твердых растворов кристаллизуются в вязком состоянии, т. е. при наличии двухфазной зоны. Эвтектические сплавы кристаллизуются в основном с образованием твердого слоя, однако наблюдаются случаи, когда затвердевание таких сплавов носит промежуточный характер между затвердеванием чистых металлов и сплавов твердых растворов.

Б. Б. Гуляев [16], Л. И. Сокольская [17] и другие исследователи утверждают, что при затвердевании отливок из реального сплава имеет место область затвердевания, в которой существуют твердая и жидккая фазы. Внутренняя граница этой области соответствует границе ликвидуса, а наружная — концу затвердевания последних капель жидкого металла, т. е. границе солидуса. Существование такой области, по мнению Б. Б. Гуляева, определяется неравномерностью роста кристаллов, связанной с кристаллографическими закономерностями и избирательной кристаллизацией, а также физико-химическими параметрами сплава. Неравномерность роста кристаллов протекает как в сплавах, так и в чистых металлах. Следовательно, область затвердевания может развиваться и в отливках из чистых металлов. Это очень важно при использовании чистых металлов.

А. А. Бочвар и И. И. Новиков [18] весь интервал кристаллизации между ликвидусом и солидусом делят на две области: жидкотвердую и твердо-жидкую. По мнению Б. Б. Гуляева, эти зоны разделяются между собой границей выливаемости, определяемой методом выливания жидкого остатка. Твердо-жидкая зона в свою очередь делится на две части по границе питания.

Изучение затвердевания сплавов на алюминиевой основе методом термического анализа, проведенное А. А. Бочваром, Адамсон, Р. У. Раддлом, Л. И. Соколовской и другими исследователями, дало возможность установить основные закономерности строения области затвердевания. Ширина области затвердевания определяется составом сплава и скоростью охлаждения. Чем больше температурный интервал кристаллизации и чем меньше скорость охлаждения, тем в большем объеме отливки одновременно существуют жидкая и твердая фазы. При малой скорости охлаждения и широком интервале кристал-

лизации область затвердевания может занимать весь объем отливки или его значительную часть.

При исследовании железоуглеродистых сплавов Б. Б. Гуляев и О. Н. Магницкий [19] показали, что с увеличением содержания углерода область затвердевания все быстрее распространяется на весь объем отливки, но процесс затвердевания всегда идет последовательно от поверхности к центру. Существенный вклад в расчеты процесса затвердевания и охлаждения отливок в зависимости от технологии их изготовления внес Г. А. Анисович [20].

Следует отметить, что приведенные исследования проводились на отливках простой конфигурации типа шар, цилиндр, стенка. Однако литая деталь, как известно, представляет собой сложную конструкцию. Продвижение фронта затвердевания в отливках сложной конфигурации зависит от их конструкции, которая определяет условия теплоотвода. Особое значение в связи с этим имеет конструктивное оформление основных элементов отливок, таких как узлы соединения, которые, являясь тепловыми узлами, становятся местами развития и концентрации различных литьевых дефектов [15], влияющих на прочность и надежность литых деталей.

Поэтому значительное внимание в проведенных исследованиях уделяется решению задачи о затвердевании отливок различной конфигурации и особенно исследованию процесса затвердевания в узлах сопряжений, определяющих формирование качественной отливки. При этом радиус закругления в прямоугольных сопряжениях является одним из основных факторов, влияющих на формирование качественного сопряжения при затвердевании и охлаждении. Правильно выбранный радиус закругления обеспечивает плотность узла соединения, уменьшает вероятность появления горячих трещин, увеличивая сопротивление узла действию эксплуатационных нагрузок, а в ряде случаев и придают литой детали большую надежность, чем увеличение толщины ее стенки.

Однако величина радиуса закругления в сопряжениях мелких стальных отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям, однозначно не определена и обычно выбирается путем длительной технологической отработки. Имеющиеся в отечественной и зарубежной литературе рекомендации отличаются зачастую в 3 раза и более (табл. 1.1), что, естественно, приводит в одних случаях к ничем не обоснованному увеличению радиусов, а следовательно, и веса отливок [16]; в других — малый радиус вызывает повышенный брак отливок, особенно по горячим трещинам [21].

Именно этим можно объяснить повышенный интерес исследователей к формированию конструктивных элементов литых деталей, их свойствам и рациональному конструированию.

Н. И. Хворинов [22] считает, что затвердевание призматической отливки квадратного сечения к концу процесса протекает так же, как и цилиндрической, диаметр которой равен стороне квадрата. Для определения продолжительности затвердевания металла во внутреннем углу сопряжения Н. И. Хворинов предлагает заменить острый угол закруглением, радиус которого равен толщине стенки; в этом случае приведенную толщину можно принимать равной $R = 0,717\delta$

(δ — толщина стенки), а время затвердевания металла в узле сопряжения определять по формуле

$$\tau = 1,95d \cdot \tau_0, \quad (1.1)$$

где τ_0 — время затвердевания стенки.

Таблица 1.1

Радиусы закругления в узлах сопряжения Т- и Х-образных конструктивных элементов отливок по выплавляемым моделям

№ п/п	Радиус закругления	Литературный источник	Примечание
1	$0,5 \cdot \delta_{\min}^*$	[46]	Для ребер на стальных отливках
2	$1,0 \cdot \delta_{\min}$	[47]	
3	$1,0 \cdot \delta_{\min}$	[48]	
4	$1,5 \cdot \delta_{\min}$	[49]	
5	$\frac{\delta_{\min} + \delta_{\max}}{2}$	[50]	Сделан пересчет при $\frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}} > 3$
6	Не более $1,5 \cdot \delta_{\min}$ Не более $1,0 \cdot \delta_{\max}$	[51]	
7	$0,5 \cdot \delta_{\max}$	[5]	
8	$\frac{1}{3} \cdot \delta$	[11]	При $\delta < 20$ мм сделан пересчет
9	$(0,3 \div 1,0)\delta$	[12]	
10	$\geq 0,8\delta$	[52]	Сделан пересчет $\delta_{\min} = \delta_{\max}$
11	$\frac{\delta_{\min} + \delta_{\max}}{3}$	[53]	Сделан пересчет
12	$(0,25 \div 2,0)\delta$	[13]	

Примечание. * — толщина стенки.

Таким образом, по Н. И. Хворинову, время затвердевания конструктивного элемента в месте сопряжения стенок примерно в 1,5–2,0 раза больше, чем самих отливок. Недостатком предлагаемого метода является то, что сравниваются острый угол и угол с радиусом закругления, равным толщине сопрягаемых стенок. При этом не учитываются радиусы закругления, лежащие между этими углами и имеющие место в реальных отливках.

В практических условиях острый угол недопустим из-за появления дефектов в узлах сопряжения. Радиус закругления, равный толщине стенки, ведет к появлению большой зоны усадочной пористости и даже к появлению раковин в непитаемых узлах, что снижает качество отливки. Применение таких радиусов, кроме излишнего расхода металла, приводит к резкому возрастанию внутренних напряжений из-за большой разницы в толщинах узла и стенок.

По мнению Ю. А. Нехедзи [23], коэффициент затвердевания во внутреннем углу примерно в 2 раза меньше, чем для стенок, а время затвердевания металла в «теплом узле» в 4–5 раз больше, чем в стенке. Ф. Брандт, Г. Бишоп и В. Пеллини пришли к заключению, что у внешних углов отливки форма отво-

дит тепло в 3 раза быстрее, чем ее плоские стенки. Р. У. Раддл [14] считает, что угол формы поглощает тепло примерно в 1,5 раза интенсивнее, чем плоская стенка формы такой же площади.

Сложность рассматриваемого вопроса и противоречивость приводимых данных сомнений не вызывает.

Р. Д. Вебстер, усовершенствовав методику выливания жидкого остатка, установил, что максимальная скорость затвердевания во внутреннем углу Х-образного сопряжения имеет место при величине радиуса примерно равной толщине ребра и составляет 0,7 от скорости затвердевания плоской стенки. Этот вывод согласуется с данными, полученными Р. У. Раддлом [14], согласно которым время затвердевания Т-образных сопряжений стенок в 1,5 раза больше времени затвердевания пластины той же толщины. Обата Ран установил, что в Т-образном сопряжении зона замедленного затвердевания распространяется от сопряжения на толщину ребра; время затвердевания пластины и теплового узла пропорционально квадрату отношения объема к поверхности, т. е. затвердевание Т-образного сопряжения также подчиняется правилу Н. И. Хворинова:

$$\tau_{\text{узла}} = \frac{I}{K^2} \left(\frac{\vartheta}{F} \right)^2, \quad (1.2)$$

где $\tau_{\text{узла}}$ — время затвердевания узла сопряжения; ϑ и F — соответственно его объем и поверхность; K — константа затвердевания, которая в условиях жидкостекольной формовочной смеси оказалась равной $0,86 \text{ мм}^2/\text{с}^{1/2}$.

Позднее это было подтверждено на отливках из олова. Однако следует отметить, что полученные выводы о размере зоны замедленного затвердевания относятся, по-видимому, к крупногабаритному стальному литью. Так как в случае небольших трещин сопрягаемых стенок трудно представить, чтобы величина радиуса закругления в сопряжении не оказала влияния на размер этой зоны. С другой стороны, если затвердование узла сопряжения подчиняется правилу Н. И. Хворинова и известна величина замедленного затвердевания, то, представляя объем узла сопряжения и его поверхность как функцию толщины сопрягаемых стенок и величины радиуса закругления в сопряжении и временем его затвердевания при данных толщинах стенок. Это указывает на один из путей возможного решения задачи о выборе оптимальных радиусов закруглений в сопряжениях по заданной разнице во времени затвердевания сопряжения и плоской стенки.

Величина пористости в местных утолщениях, по мнению Б. Б. Гуляева, зависит от толщины стенки, определяющей время существования изолированного объема жидкого металла. Для каждой толщины стенки в сопряжении существует свой оптимальный радиус закругления с точки зрения плотности узла сопряжения. При радиусах закруглений меньших или больших оптимального плотность металла в узле уменьшается. Расчеты, выполненные Б. Б. Гуляевым для случаев пересечения стенок с соотношением толщин 1:1, 1:2, показали, что положение максимума плотности металла в узле сопряжения определяет стенку, имеющую большую толщину. На основании анализа процессов формирования дефектов в сопряжениях стальных отливок предложен график для выбора

радиусов закругления в сопряжениях стальных отливок, изготавляемых в песчаных формах.

М. Скарбинский [4] различные узлы сопряжения стенок сводит к следующим основным типам: лобовое — стык двух стенок разных толщин, лежащих в одной плоскости; прямоугольное — стык двух стенок под острым углом в виде буквы L; впритык — стык трех стенок в виде буквы Т; крестообразное — стык четырех стенок в виде буквы Х. Для установления влияния конструкции двух, трех и четырех стенок на размеры усадочных раковин, образующихся в утолщенных узлах, он исследовал ряд проб с различными сопряжениями. Причем для каждого узла с сопряжением изменилась площадь усадочных раковин внутри каждого сечения. При одном и том же диаметре вписанной окружности площадь усадочной раковины неодинакова для различных узлов. Наибольшая усадочная раковина образуется в Х-образном узле сопряжения и постепенно уменьшается в сопряжениях типа Т, В, Y, L. Это же ранее было высказано В. М. Андреевым [7].

С. А. Казенов и В. М. Андреев показали, что величина усадочной раковины в X-, T-, V-, Y-, L-образных узлах зависит от диаметра вписанной окружности и конфигурации сопряжения. Для определения величины усадочной раковины в сопряжении они рекомендуют пользоваться правилом Вилькенсона, согласно которому места пересечения тепловых потоков принимают за участки, заполненные металлом.

Для Т- и Х-образных сопряжений В. М. Андреев рекомендует брать меньшие радиусы закругления, но в пределах от 1/6 до 1/3 толщины сопрягаемых стенок. При этом Х-образные сопряжения предлагается выполнять так, чтобы одна стенка была смещена относительно другой. Смещать стенки в Х-образных сопряжениях друг относительно друга рекомендуют Н. Келли, Б. А. Носков и другие исследователи.

Применительно к стальному литью по выплавляемым моделям С. А. Казенов предлагает сдвигать ребра на величину $2r + \delta$ (r — радиус закругления, δ — толщина ребра), расстояние между вертикальными стенками рекомендует определять из следующей зависимости:

$$\ell = t - K,$$

где t — средняя толщина стенок, между которыми определяется расстояние, мм; K — коэффициент, выбираемый по таблице в зависимости от толщины стенок отливок; для t до 6 мм $K = 1$.

Исходя из этой зависимости для средней толщины стенок $t = 2$ мм, $\ell = 1$ мм, что абсурдно. Другие исследователи считают необходимым смещать ребра на величину большую, чем одна, две, шесть или восемь толщин максимальной из сопрягаемых стенок. Противоречивость приведенных рекомендаций очевидна.

С. П. Колесников [24] предлагает расчетные формулы и номограммы для определения радиусов закруглений в сопряжениях, расстояния между сопрягаемыми узлами, толщины выступов и ребер, размеров холодильников. Однако пользование ими для практических целей не представляется возможным, так

как они не учитывают температуры перегрева и заливки металла, наличия распределенной усадочной и газоусадочной пористости; неверно учтена автором в расчетах и скрытая теплота кристаллизации. Приведенные С. П. Колесниковым зависимости не подкрепляются соответствующими экспериментами для конкретных сплавов и отливок.

Большое научное и практическое значение имеют фундаментальные работы В. Б. Гокуна [2] и П. И. Орлова [1]. В этих работах глубоко проанализированы литературные данные и обобщен производственный опыт по конструированию литых деталей. Общие правила конструирования литых деталей приведены в работах З. А. Шагаева, Э. А. Сателя и многих других авторов.

Для выбора оптимального варианта конструктивного оформления сопряжений литых деталей многие исследователи [4, 5, 8] рекомендуют пользоваться классическим правилом вписанных окружностей. Однако использование этого правила возможно лишь для простых сечений и, видимо, целесообразно только в случае равных или близких толщин сопрягаемых стенок. Во-вторых, в ряде случаев настолько усложняется конструкция сопряжения, что при наличии последующей механической обработки применение этого правила становится просто нерациональным со всех точек зрения.

Противоречивость и недостаточная обоснованность рекомендаций по конструктивному оформлению литых деталей связаны с тем, что они основаны, главным образом, на общении производственного опыта изготовления отливок, а не на конкретных исследованиях кристаллизации сплавов в отливках и механических свойств литых деталей. Без проведения таких исследований нельзя сколько-нибудь серьезно решать задачу о выборе рациональной конструкции литой детали с обеспечением ее высокого качества и надежности.

Конструктивное оформление отливки, как известно, оказывает существенное влияние на возникновение внутренних напряжений и образование трещин. Вопросы образования напряжений и трещин в отливках в зависимости от химического состава сплава, температурных условий плавки, заливки и охлаждения отливок, материала форм, конструкции отливок широко изучали многие исследователи.

Исследования свидетельствуют о том, что главными причинами образования горячих трещин в отливках являются возникновение термических узлов и торможение литьевой усадки. Величину и характер расположения горячих и холодных трещин в сопряжениях конструктивных элементов отливок в значительной степени определяет их конструктивное оформление, в том числе и величина внутренних радиусов закруглений в сопряжениях.

Большое внимание вопросам образования трещин в отливках уделял академик А. А. Бочвар [25]. Он установил, что по мере увеличения количества второго компонента в сплавах типа твердого раствора и до появления эвтектики растет величина температурного коэффициента кристаллизации, в связи с чем увеличиваются остаточные напряжения, приводящие к образованию трещин. Трещины в легких сплавах чаще всего образуются на внутренней стороне острых углов отливки, в местах перехода от толстого сечения к тонкому, в местах подвода металла к отливке.

Б. Б. Гуляев [16] показал, что трещины в отливках образуются из-за торможения усадки при охлаждении в твердом состоянии. Для определения влияния величины радиуса закругления на склонность к образованию горячих трещин Б. Б. Гуляев сопоставляет толщину слоя, затвердевшего в узле сопряжения к моменту затвердевания стенки. Он считает, что с увеличением радиуса закругления уменьшается склонность отливки к образованию горячих трещин: чем больше толщина стенки, тем сильнее оказывается наличие сопряжения на образование горячих трещин; чем меньше толщина стенки, тем с большей скоростью увеличивается прочность сопряжения.

Известно, что при прочих равных условиях продолжительность затвердевания стальной отливки в форме, нагретой до 900°C, примерно в 6–7 раз, а нагретой до 1200°C — в 30 раз больше, чем в холодной (20°C). Понижение скорости затвердевания стальной отливки в нагретой оболочной форме, полученной по выплавляемым моделям, способствует уменьшению температурного перепада в толстых и тонких частях ее, вследствие чего снижаются температурные напряжения и вероятность образования трещин.

Тем не менее природа и механизм некоторых видов трещин полностью не изучены, особенно слабо изучены микро- и субмикроскопические трещины. Этот вид дефектов обусловлен главным образом технологическими особенностями приготовления, заливки и кристаллизации жидкого металла, условиями охлаждения и взаимодействия жидкого металла и отливки с литьевой формой, учет которых представляет собой большие трудности. В настоящее время наиболее полно изучены кристаллизационные трещины, зарождение и развитие которых происходит в эффективном интервале кристаллизации сплава.

Известно, что новые реальные металлы и сплавы имеют в большем или меньшем количестве дефекты, оказывающие существенное влияние на механические свойства. К таким дефектам относятся точечные дефекты, вакансии, межузельные атомы и др.; одномерные (литейные) дефекты — дислокации; двумерные (поверхностные) дефекты — границы зерен и двойников, дефекты упаковки и др.; трехмерные (объемные) дефекты — пористость, различные неметаллические включения и т. д. Определенные успехи учения о прочности и пластичности материалов в последние годы находятся в связи с развитием представлений о роли дефектов структуры в пластической деформации и в разрушении твердых тел, исходя из теории точечных дефектов и теории дислокаций. Вместе с тем следует отметить, что взаимодействие указанных дефектов (вакансий, дислокаций) друг с другом и с другими дефектами настолько сложны, что современные теории не позволяют предсказывать прочность деталей из реальных материалов. Так, теория дислокаций позволяет лишь качественно охарактеризовать процесс деформации, разрушения и упрочнения материалов и изделий. Взаимодействие же кристаллов между собой в напряженном состоянии вообще исследовано недостаточно; то же относится и к влиянию масштаба изделий, гетерофазности или метастабильности структуры сплавов, наличие пористости, неметаллических включений, поведению сплавов в конструкциях машин и процессы их разрушения.

С. Т. Кишкин [26] указывает, что теория прочности кристаллических тел должна исходить не только из прочности межатомного сцепления, но и отражать связь между структурой материала и его механическими свойствами. Я. И. Френкель убедительно раскрывает роль и влияние внутренних дефектов в металлах и сплавах, качества поверхности на прочность.

С. И. Губкин [27] доказывает, что основой теории механических свойств является зависимость между химическим составом, структурой сплава и его механическими свойствами. Далее он указывает, что новые методы расчета на прочность должны основываться не только на законах упругого изменения формы, но и на законах пластической деформации. Однако Е. М. Макушок, А. С. Матусевич, В. П. Северденко и В. М. Сегал [28] справедливо отмечают, что описание механического поведения реальных тел столь сложно, что их свойства приходится идеализировать и пользоваться некоторыми математическими моделями со значительными допущениями. Так, например, и поступают Г. С. Писаренко, В. Н. Руденко, Г. Н. Третьяченко и В. Г. Трощенко [29] при расчете прочности и несущей способности материалов и элементов конструкции, работающих в условиях высоких температур.

Тем не менее Е. М. Савицкий [30] считает, что имеются огромные резервы повышения прочностных характеристик материалов и в особенности при их работе в конструкциях. Важнейшая роль в решении этой задачи принадлежит не только теоретикам — прочнистам, но и технологам — материаловедам.

Серьезные исследования влияния технологии изготовления заготовок под образцы и самих образцов при определении механических свойств провели Ю. А. Нехендзи [23], Ю. А. Шульте [30, 31] и другие исследователи. Установлено, что форма заготовки и технология ее изготовления оказывают существенное влияние на стабильность показателей механических свойств.

Механические свойства стали при литье по выплавляемым моделям обычно оцениваются по результатам испытаний образцов, вырезанных из специально изготовленной пробы (ГОСТ 977-58), отдельно отлитых [30] или прилитых [23] образцов. Однако в большинстве случаев они не дают представления о свойствах металла и сплава в самих отливках, тем более что при механических испытаниях получаются разные результаты (табл. 1.2). Как справедливо замечают Ю. А. Нехендзи [23], Ю. А. Шульте [30, 31], А. В. Иверест [32], В. Н. Иванов, В. С. Курчман, М. Л. Подольский [33] и другие исследователи, свойства, полученные на таких образцах, характеризуют в основном качество металла, а не литой детали. Признавая этот факт, авторы работы [33] для определения механических свойств отливок по выплавляемым моделям, тем не менее, рекомендуют применять литье образцы, изготовленные в таких же условиях, как и отливки, т. е. в конечном итоге определять качество металла в зависимости от технологических условий изготовления, а не свойства отливок.

С. А. Казенов, А. И. Зайцев и другие исследователи считают, что механические свойства металла отливок, изготовленных литьем по выплавляемым моделям несколько ниже, чем металла из заготовок, полученных ковкой или штамповкой. И далее, А. И. Зайцев [34] заключает, что детали, испытывающие при эксплуатации большие нагрузки, не должны изготавляться литьем по вы-

плавляемым моделям. В то же время В. М. Королев, В. М. Степанов [35] убедительно показывают, что детали, изготовленные по выплавляемым моделям, не только не уступают, но в ряде случаев обладают более надежными эксплуатационными свойствами, чем детали, полученные из поковок, штамповок.

Таблица 1.2

Снижение механических свойств для литых круглых и плоских образцов из углеродистых сталей при литье по выплавляемым моделям по отношению к свойствам образцов из трефовидных проб по ГОСТ 977-58 [33]

Механические свойства	Для круглых образцов диаметром 5–6 мм, %	Для плоских образцов толщиной 2–3 мм, %
σ , кг/мм ²	10	20
δ , %	15	25
Ψ , %	20	30

Этого же мнения придерживается и фирма Arwood (США), которая изготавливает ряд деталей (скоба гидравлического механизма, поддерживающего определенное расстояние между лопастями) военного вертолета фирмы Boeing Vertol способом литья по выплавляемым моделям с заливкой под вакуумом. Материал скобы — нержавеющая сталь. Прежняя технология — ковка — не обеспечивала требуемой конфигурации скобы, т. е. не позволяла получить необходимую криволинейную поверхность в месте крепления скобы к лопасти. Поэтому приходилось прибегать к дорогостоящей механической обработке. Эксплуатационные испытания литой скобы подтвердили ее преимущества по сравнению с ковкой и механической обработкой.

Результаты многочисленных исследований механических свойств показывают, что прочность и особенно пластичность литого металла в значительной мере зависят от неоднородности металла — размера и ориентации кристаллических зерен, сегрегации растворимых и нерастворимых примесей, образовавшихся в процессе затвердевания, величины и распределения усадочной пористости и других дефектов. Еще в большей степени это сказывается в фасонных отливках, где имеются дополнительные конструктивные и технологические факторы, влияющие на неоднородность металла.

Частично изучено влияние технологии плавки [31, 36–38], условий питания и кристаллизации, формы и размеров образцов [38–41] на механические свойства применительно к литью в песчаные формы.

Некоторые закономерности влияния технологических и конструктивных факторов на механические свойства отливок, получаемых в песчаных формах, имеют общий характер и в равной мере относятся к литью по выплавляемым моделям. Это, прежде всего, общепринятый вывод о том, что неоднородность строения стали неодинаково сказывается на различных характеристиках ее механических свойств.

К такому же выводу пришли Р. Ф. Полиш и М. С. Флемингс [42] при изучении механических свойств отливок, залитых в металлические, песчаные, горячие формы и формы с односторонним направленным затвердеванием. Ими доказано, что различные типы структур — равноосная, столбчатая и смесь равноос-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru