

Определение оптимальной навески модификатора с использованием метода термического анализа – подробное исследование

*Васко Поповски (Vasko Popovski), дипломированный инженер
Компания Ekem Metals, Inc., Питтсбург, штат Пенсильвания, США*

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью модифицирования является получение чугунов с микроструктурой, не содержащей карбидов железа (отбела) и минимизация склонности чугуна к усадке. Решение этих задач в значительной степени зависит от типа применяемого графитизирующего модификатора и его расхода при обработке чугуна.

Недостаточно модифицированные чугуны переохлаждаются до температур, лежащих ниже температуры эвтектического превращения метастабильной диаграммы состояния Fe-C (1147°C). Это приводит к формированию в структуре отливки карбидов. Таким образом, недостаточно эффективное модифицирование приводит к образованию карбидов, которые, в свою очередь, провоцируют формирование усадки. Усадка образуется из-за недостатка углерода, необходимого для формирования и роста включений графита, компенсирующих усадку металлической матрицы в процессе кристаллизации расплава. Проще говоря, углерод, который мог бы выделяться в виде включений графита, увеличивающихся в объеме в процессе кристаллизации, связан в плотные, твердые карбиды, провоцирующие формирование усадки.

Модифицирование избыточным количеством модификатора приводит к дополнительным затратам и также может спровоцировать формирование усадочных дефектов. Это связано с тем, что в результате такой обработки происходит интенсивное образование включений графита на ранних стадиях процесса кристаллизации расплава, что может привести к тому, что количество графита, образующегося на поздних этапах процесса затвердевания отливки, будет недостаточно для компенсации усадочных тенденций. Кроме того, интенсивное образование графита на ранних стадиях может привести к изменению геометрии полости формы, которое, в свою очередь, может спровоцировать образование макроусадочных дефектов.

Перечисленные выше факторы означают, что для литейного производства весьма важно определять оптимальный расход модификатора с учетом необходимости решения различных задач: предотвращения отбела, усадки и оптимизации затрат на модифицирование. Зачастую приходится решать перечисленные задачи одновременно. Как избыточное, так и недостаточно эффективное модифицирование может привести к заметному снижению качества литья, поэтому, в идеальном случае, величину навески модификатора необходимо подбирать для каждой отливки индивидуально, исходя из предъявляемых к ней требований.

Термический анализ является высокоэффективным средством определения оптимальной величины навески модификатора, которая позволит заметно снизить себестоимость литья и величину брака в отливках по отбелу и усадке. Также существует вероятность того, что на литейном предприятии используются избыточные или недостаточные навески модификатора. Оптимальная навеска модификатора, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым при производстве одного типа отливок, может отличаться от оптимальной навески, используемой при производстве другого типа отливок. Так при производстве одних отливок наиболее важным может являться предотвращение отбела, а при производстве других – борьба с усадкой. Термический анализ является удобным инструментом для точного определения оптимальной величины навески модификатора, а также для выбора типа модификатора, наиболее подходящего для удовлетворения специфических требований для каждого отдельного случая.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На литейном предприятии А, специализирующемся на производстве отливок из высокопрочного чугуна, была проведена серия экспериментов по определению навески модификатора, оптимальной для конкретных условий данного предприятия. Вторичное графитизирующее модифицирование в заливочном ковше всех выпускаемых марок высокопрочного чугуна в течение продолжительного времени проводилось фиксированной навеской кальцийсодержащего ферросилиция (ФС50), равной 0,7 % масс. Проведенные ранее исследования показали, что снижение расхода модификатора до 0,4 % масс. позволяет снизить себестоимость продукции без ухудшения качества отливок. Целью настоящего исследования было получение количественных данных с применением термического анализа для подтверждения этого факта и для определения оптимальной величины навески применяемого в цехе модификатора.

Обработка базового чугуна происходит «сэндвич-процессом» с использованием сфероидизирующего модификатора марки ФСМг5 навеской, равной 1,8 % масс. На модификатор сверху укладывается защитное покрытие из стальной стружки в количестве 1,3 % масс. После обработки базовый чугун переливается в заливочный ковш с одновременной присадкой графитизирующего модификатора на струю металла.

В процессе проведения эксперимента было использовано 4 различных по массе навески графитизирующего модификатора (0,2%, 0,4%, 0,6% и 0,8% от массы обрабатываемого чугуна). После модифицирования отбирались пробы для проведения термического анализа и записи кривых охлаждения с использованием системы ATAS® (Adaptive Thermal Analysis System – Адаптивная система термического анализа производства компании NovaCast). Пробы отбирались следующим образом: первая проба – сразу после проведения вторичного графитизирующего модифицирования, а последующие – по одной пробе каждые 2 минуты в течение 15 минут.

Система ATAS® записывает и генерирует ряд числовых параметров. При изучении эффекта модифицирования в настоящем исследовании отслеживали изменения четырех характерных параметров: TE_{low} , R, GF1 и GF2. Смысл этих параметров будет пояснен ниже.

TE_{low} – это нижнее значение температуры эвтектического превращения. Высокие значения TE_{low} показывают, что температура эвтектического превращения далека от температуры метастабильного эвтектического превращения и, следовательно, чугун менее подвержен отбелу, по сравнению с чугунами с более низкими значениями TE_{low} .

R – это эвтектическая рекалесценция. Эта величина характеризует повышение температуры расплава за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации во время протекания эвтектического превращения. Высокие значения R могут указывать на нежелательное образование включений графита на ранних стадиях процесса кристаллизации чугуна, что повышает риск нарушения геометрии полости формы и образования первичной усадки. Кроме того, образование включений графита на ранних стадиях кристаллизации расплава и их рост может привести к недостатку углерода для роста включений графита в конце цикла кристаллизации, что повышает риск формирования усадочной микропористости.

GF1 – это коэффициент графита 1 системы ATAS®, который отражает скорость выделения графита в процессе эвтектического превращения. Желательными являются повышенные значения GF1, которые свидетельствуют о равномерном ходе процесса образования графита и, соответственно, о меньшем риске образования усадки.

GF2 – коэффициент графита 2, определяемый по первой производной от кривой охлаждения, который характеризует интенсивность образования графита в конце процесса кристаллизации. Желательно иметь пониженные значения GF2, так как они указывают на образование графита в конце процесса кристаллизации, что препятствует усадке последних затвердевающих порций расплава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 приведена кривая охлаждения, полученная в результате анализа чугуна, обработанного навеской модификатора равной 0,4 % масс. Этот образец был отобран через 3 минуты после отбора первого образца плавки. На рис. 2 показан график первой производной от кривой охлаждения, приведенной на рис. 1. Эти рисунки также хорошо иллюстрируют контролируемые в настоящем исследовании параметры термического анализа, смысл которых обсуждался выше. Следует отметить, что рис. 1 и 2 иллюстрируют весьма благоприятную ситуацию: хорошо видно небольшое повышение температуры в начале эвтектического превращения (низкая рекалесценция – рис. 1) и малый угол наклона первой производной в конце графика (рис. 2), что соответствует низкому значению GF2.

Аналогично, на рис. 3 и 4 показаны соответствующие кривые для чугуна, обработанного навеской модификатора равной 0,6 % масс. Эти образцы были отобраны через две минуты после отбора первого образца данной плавки. Из рис. 3 и 4 видно, что величина рекалесценции заметно выше, увеличился и угол наклона производной в конце эвтектического превращения, соответствующий величине GF2. В сравнении с графиками на рис. 1 и 2, кривые на рис. 3 и 4 характеризуют менее благоприятные условия кристаллизации.

На рис. 5 показано, что разброс значений TE_{low} образцов, взятых сразу после проведения модифицирования (время = 0), составляет более 6 °С. Независимо от величины навески модификатора значение TE_{low} с течением времени уменьшается, что означает снижение температуры начала графитизации для всех исследованных чугунов. У чугуна, обработанного навеской модификатора, в размере 0,4% масс., значения TE_{low} оставались наивысшими на протяжении всего времени выдержки. Более того, использование навесок больших размеров привело к падению значений TE_{low} с течением времени. Из этого следует, что оптимальным размером навески модификатора является 0,4% масс., поскольку он обеспечивает наиболее высокие значения TE_{low} во время выдержки расплава. Еще одним заключением, которое можно сделать при анализе этих результатов, является то, что использование повышенных навесок модификатора не является гарантией того, чугун обладает повышенной

стойкостью к отбелу в процессе выдержки расплава после проведения графитизирующего модифицирования.

Из рис. 6 видно, что величина рекалесценции растет с увеличением навески модификатора. Это подтверждает существующую теорию о том, что избыток модификатора приводит к интенсивному образованию включений графита на начальных стадиях процесса кристаллизации. В идеальном случае, более предпочтительны низкие значения рекалесценции. Из рис. 2 видно, что минимальное значение рекалесценции было получено при использовании навесок модификатора, равных 0,2 или 0,4 % масс.

График на рис. 7 показывает, что величина GF1 возрастает в течение первых 3 – 4 минут после проведения модифицирования практически для всех навесок модификатора. Большинство точек на графике свидетельствуют, что максимальные значения GF1 достигаются при использовании навески, равной 0,4% масс. Примерно через 5 минут после модифицирования величины GF1 начинают постепенно снижаться в течение всего оставшегося времени выдержки.

Из рис. 8 видно, что наименьшие величины GF2 наблюдаются при использовании навесок модификатора, равных 0,2 % масс. и 0,4 % масс. Это согласуется с тем, что величина рекалесценции тем меньше, чем меньше навеска модификатора, вводимого в расплав – т.е. менее интенсивное образование включений графита в начале процесса затвердевания обеспечивает формирование большего количества графита на конечной стадии. В большинстве случаев, более желательным является формирование основного количества включений графита на заключительной стадии процесса кристаллизации, так как это позволяет компенсировать усадку и избежать формирования усадочной микропористости. Необходимо отметить, что значения GF2 уменьшаются в течение первых трех минут после модифицирования при использовании любых навесок модификатора, после чего они остаются практически неизменными в течение всего времени выдержки.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные данные, полученные с помощью системы термического анализа ATAS®, показывают, что обработка чугуна навеской модификатора, равной 0,4 % масс., обеспечивает получение металла более стойкого к образованию усадочной пористости, по сравнению с чугуном, обработанным другими навесками модификатора. Также было обнаружено, что чугун, обработанный навеской модификатора, равной 0,4 % масс., более стоек к отбелу, чем при обработке другими навесками модификатора, особенно при выдержках расплава после модифицирования. Результаты исследования подтверждают, что навеска модификатора, равная 0,4% от массы чугуна, является оптимальной для условий данного литейного цеха.

Результаты настоящей работы также позволяют сделать вывод о том, что обработка чугуна повышенной навеской модификатора не является гарантией уменьшения «старения» модифицирующего эффекта.

Экспериментальные данные также приводят к выводу о том, что, по крайней мере, в условиях данного цеха, свойства чугуна, определяемые методом термического анализа, заметно изменяются с течением времени после проведения модифицирования. Анализ результатов показывает, что по истечении 3-4 минут после модифицирования стойкость металла к усадке заметно возрастает.

После проведенных исследований литейный цех в течение года проводил обработку чугуна навесками модификатора, равными 0,4 % масс. и результатом этого явилось то, что за этот год повышения уровня брака отливок по отбелу и усадочным дефектам не наблюдалось. В то же время расход модификатора снизился на 43 %. Эти факты отчетливо свидетельствуют о том, что термический анализ может служить мощным средством для обоснования повышения эффективности металлургического производства, снижения затрат на шихтовые материалы и оптимизации навесок литейных ферросплавов.

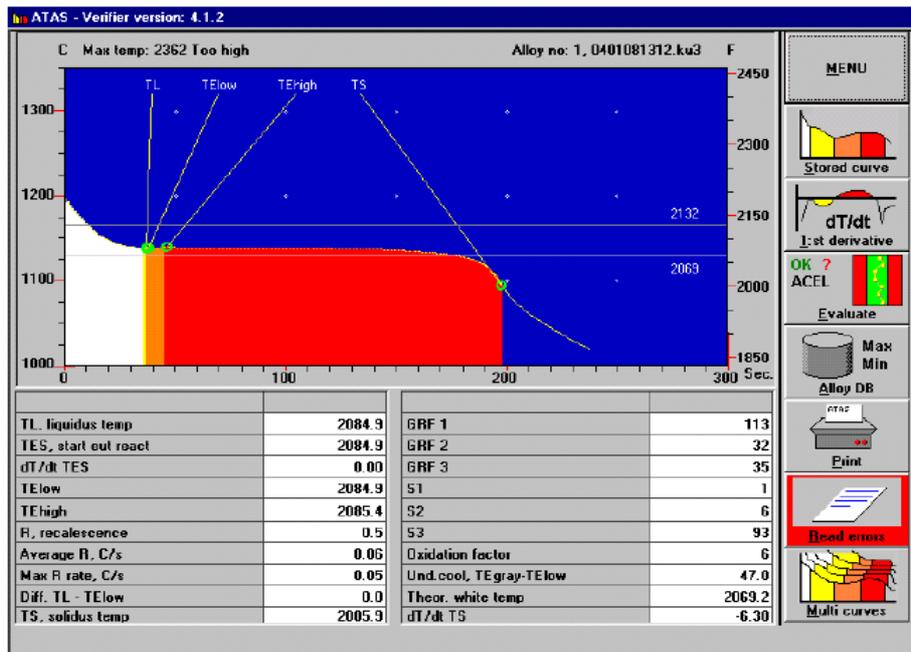


Рис. 1. Кривая охлаждения образца, обработанного навеской модификатора в размере 0,4 % масс.

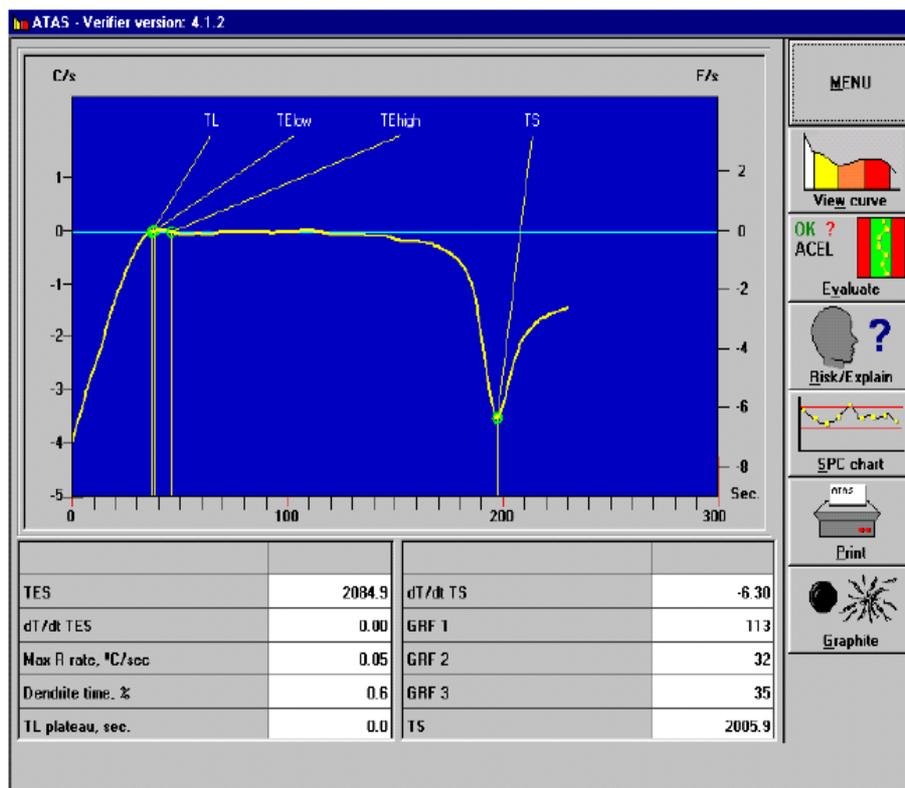


Рис. 2. График первой производной от кривой охлаждения, показанной на рис. 1

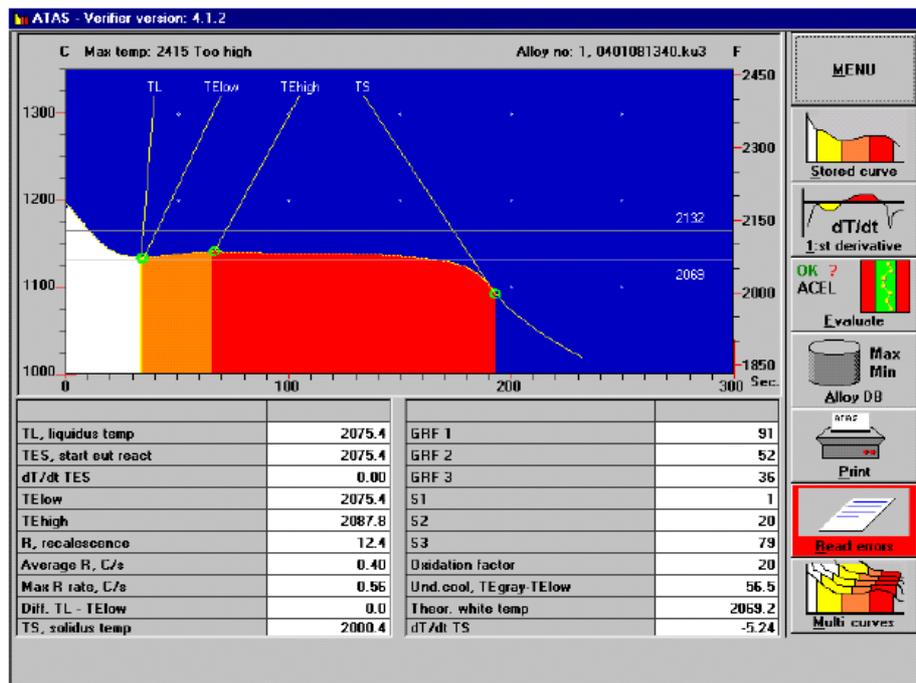


Рис. 3. Кривая охлаждения образца, обработанного навеской модификатора в размере 0,6 % масс.

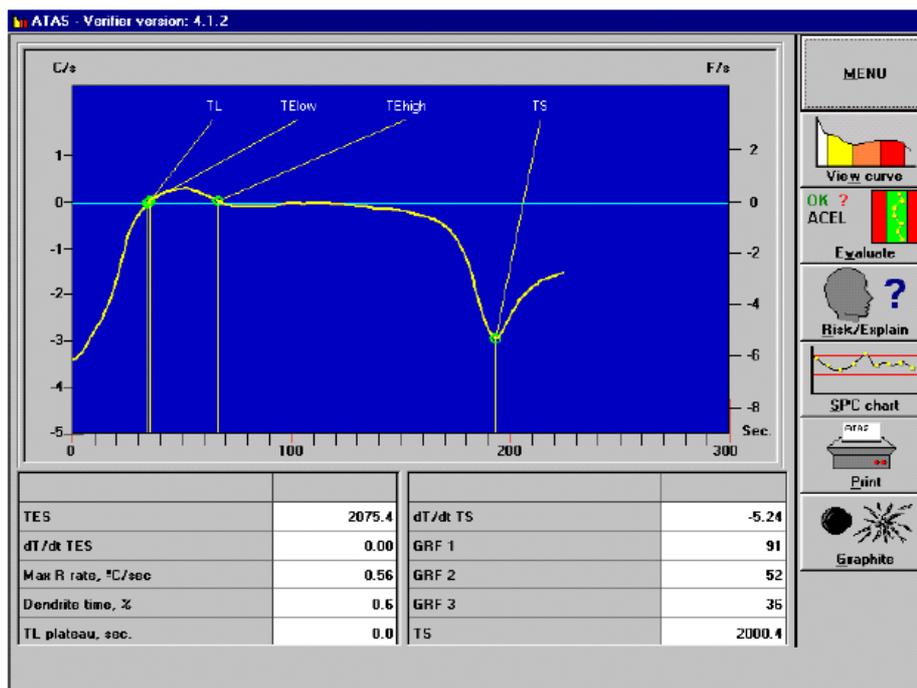


Рис. 4. График первой производной от кривой охлаждения, показанной на рис. 3

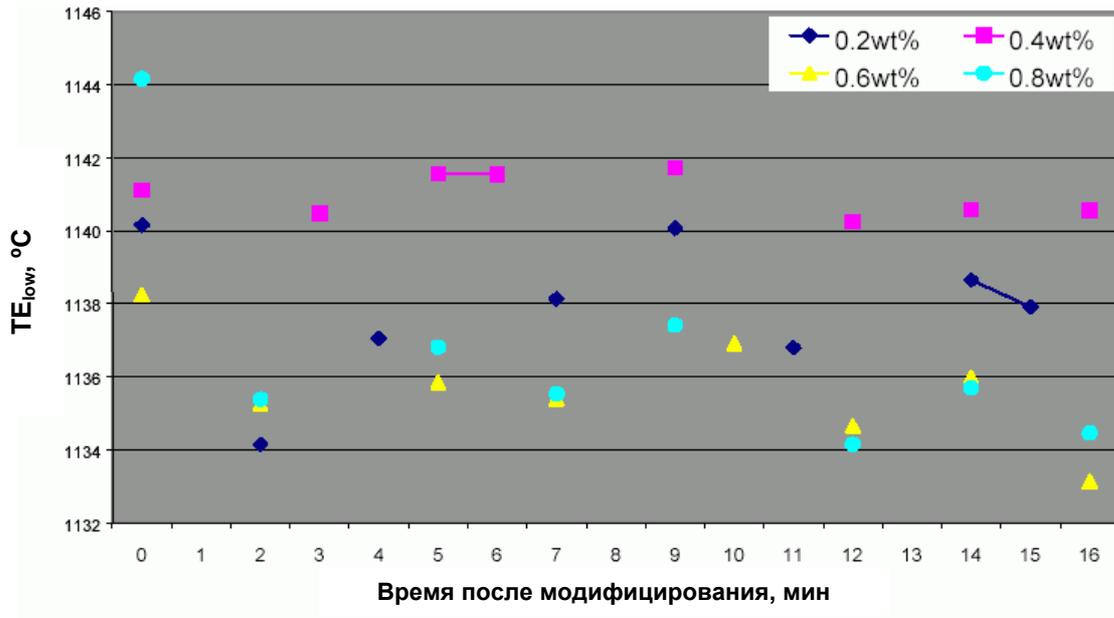


Рис. 5. Зависимость TE_{low} от времени при обработке чугуна различными навесками модификатора.

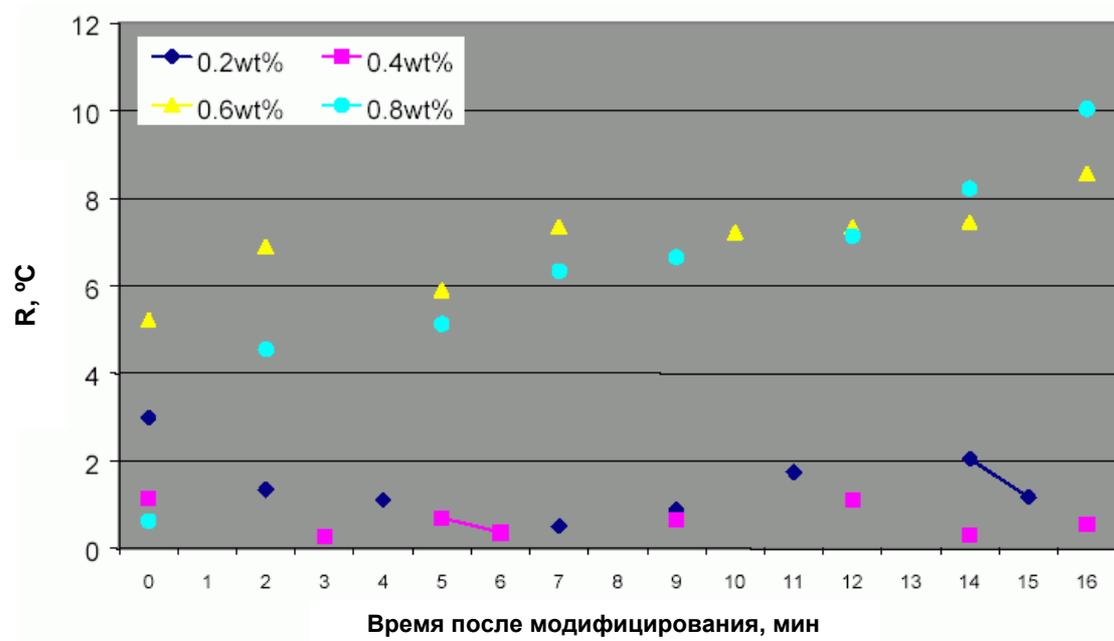


Рис. 6. Зависимость R от времени при обработке чугуна различными навесками модификатора.

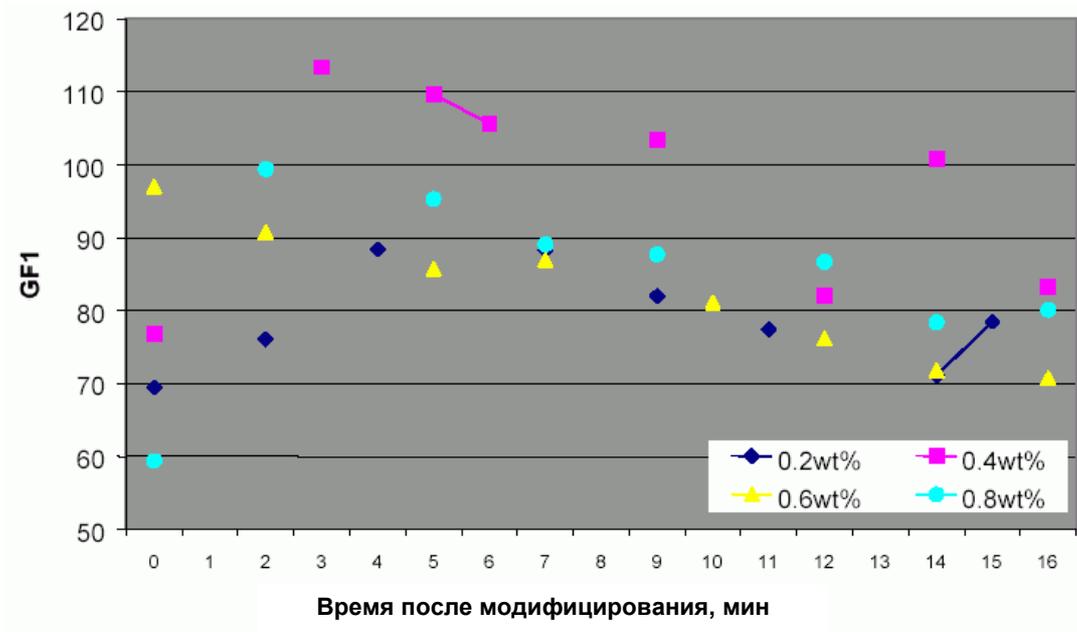


Рис. 7. Зависимость GF1 от времени при обработке чугуна различными навесками модификатора.

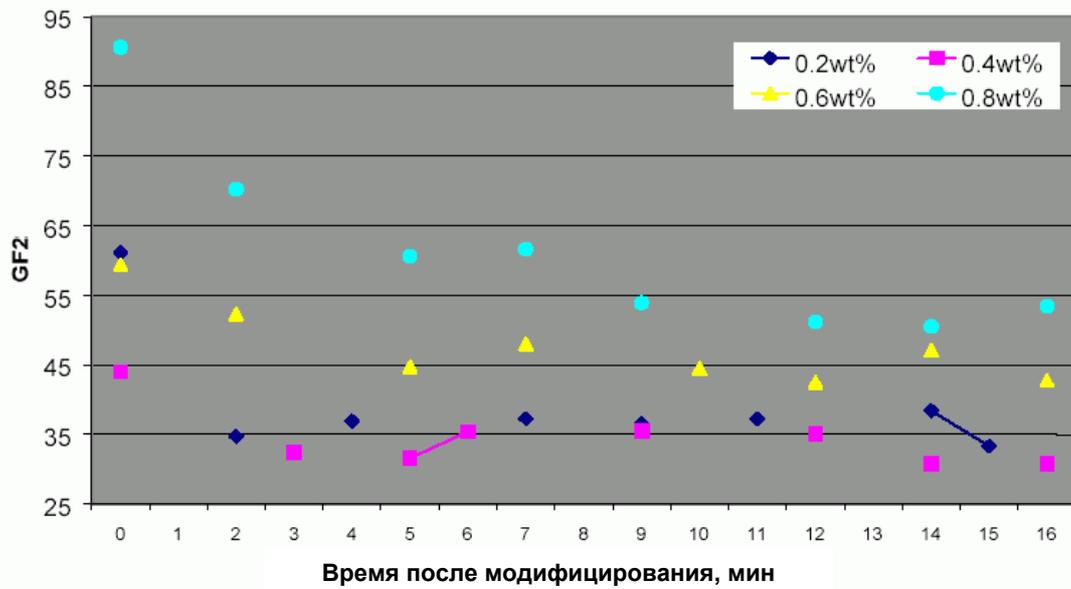


Рис. 8. Зависимость GF2 от времени при обработке чугуна различными навесками модификатора.