

Главатских М.В.,¹ Хомутов М.Г., Поздняков А.В. ¹НИТУ МИСИС m2107093@edu.misis.ru

Деформируемые сплавы Al-Zn-Mg-Cu широко используются в авиационной и аэрокосмической промышленности благодаря своей высокой прочности. Высокое содержание легирующих элементов обеспечивает отличный эффект упрочнения после старения. Скандий и цирконий являются хорошо известной парой, которая может улучшить механические свойства сплавов Al-Zn-Mg-Cu при комнатной и повышенной температурах за счет зарождения наноразмерных выделений фазы $L1_2$ -Al₃(Sc,Zr) во время гомогенизации. Аналогичное влияние на микроструктуру и свойства Al может оказывать сочетание Er и Zr. Er может быть не только элементом, образующим выделения, но и элементом, образующим эвтектику. Богатые Er фазы эвтектического происхождения обладают повышенной устойчивостью к росту при гомогенизации, что способствует достижению высокой прочности сплава. На основе этих принципов был разработан новый литейный и деформируемый сплав Al-3Zn-3Mg-3Cu-Zr-Y(Er) с повышенной жаропрочностью.

Целью данного этапа исследования является определение влияния легирования Er на поведение сплава Al-3Zn-3Mg-3Cu-0,2Zr при горячей деформации путем моделирования 3D-карт.

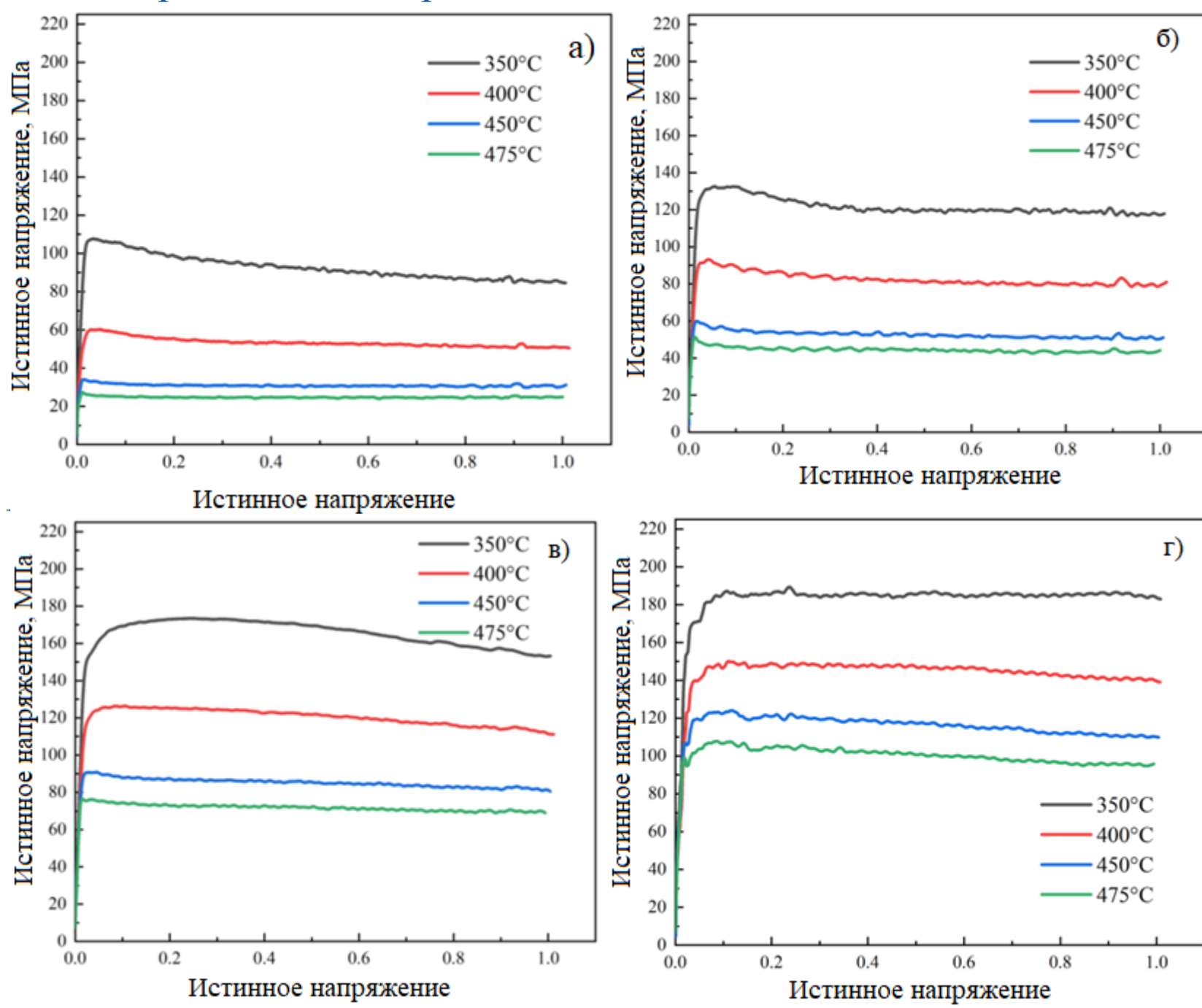


Рисунок 1 – Кривые напряжения сжатия-деформации сплава Al3Zn3Mg3Cu при различных скоростях деформации: 0,01 c⁻¹ (а), 0,1 c⁻¹ (б), 1 c⁻¹ (в), 10 c⁻¹ (г)

Для сравнения способности сплавов к горячей штамповке в исследовании также применялся подход карт деформации. Сравнение карт деформации при разных параметрах деформации для обоих сплавов представлено на рисунке 3.

Как видно, оба сплава имеют широкую область хорошей диссипации энергии (более 30 %) при высоких температурах и низких скоростях деформации. Однако устойчивость течения существенно различается. Деформирование сплава без добавки эрбия при скоростях деформации более 0,1 c⁻¹ может привести к локализации течения практически во всем диапазоне температур в начале деформации, что может обеспечить разрушение в более жестких условиях деформации, чем сжатие. В то же время критерий неустойчивости течения для сплава, легированного эрбием, имеет отрицательное значение только при высоких скоростях деформации и температурах ниже 420 °C, что свидетельствует о лучшей формовочности сплава. Равномерно распределенные частицы предотвращают образование полос сдвига с повышенным запасом энергии и снижают вероятность зарождения трещин при горячей деформации на начальных стадиях, когда работает единственный механизм размягчения (динамическое восстановление).

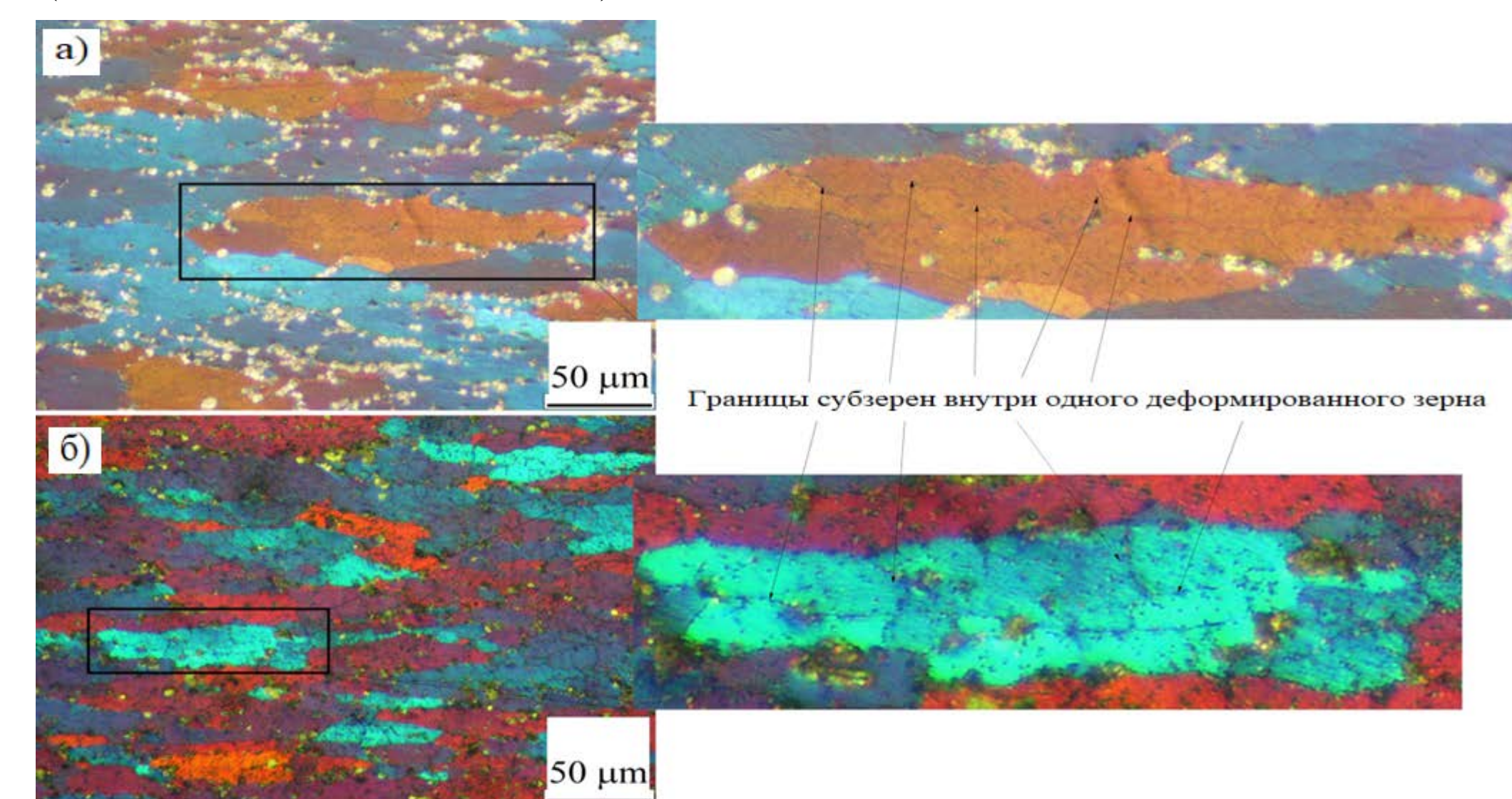


Рисунок 4 - Зеренная структура сплавов Al3Zn3Mg3Cu (а) и Al3Zn3Mg3CuEr (б) после деформации при 450 С и 0,01 с-1 (ОМ)

Выводы:

- Исследованные сплавы продемонстрировали типичное поведение при горячей деформации. Истинное напряжение имеет тенденцию увеличиваться с понижением температуры и увеличением скорости деформации. Добавление Er приводит к уменьшению истинного напряжения при скоростях деформации 0,01 – 1 c⁻¹ за счет механизмов размягчения, стимулированных частицами.
- Эффективная энергия активации для сплава с добавкой Er имеет меньшее значение, что подтверждает более легкий процесс горячей деформации в сплаве с повышенной объемной долей интерметаллидных частиц.
- Исследованные сплавы обладают широкой областью хорошей диссипации энергии при высоких температурах и низких скоростях деформации. Критерий неустойчивости течения для сплава, легированного эрбием, имеет отрицательное значение только при высоких скоростях деформации и температурах ниже 420 °C, что свидетельствует о лучшей формовочной способности сплава. Равномерно распределенные частицы предотвращают образование полос сдвига с повышенным запасом энергии и снижают вероятность зарождения трещин при горячей деформации на начальных стадиях, когда работает единственный механизм размягчения (динамическое восстановление). Микроструктура доказывает, что основным механизмом размягчения является динамическое восстановление.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10142), <https://rscf.ru/project/22-79-10142/>.

Детальное исследование микроструктуры и фазового состава литых и гомогенизированных сплавов Al3Zn3Mg3Cu и Al3Zn3Mg3CuEr было проведено на предыдущих этапах исследования. Основное различие между двумя сплавами заключается в температуре солидуса. Добавки эрбия обеспечивают увеличение солидуса сплава и возможность повышения температуры горячей деформации.

Исследованные сплавы продемонстрировали типичное поведение при горячей деформации (рисунок 1-2). С понижением температуры и увеличением скорости деформации истинное напряжение увеличивается. Добавление Er приводит к уменьшению истинного напряжения при скоростях деформации 0,01–1 c⁻¹ за счет механизмов разупрочнения.

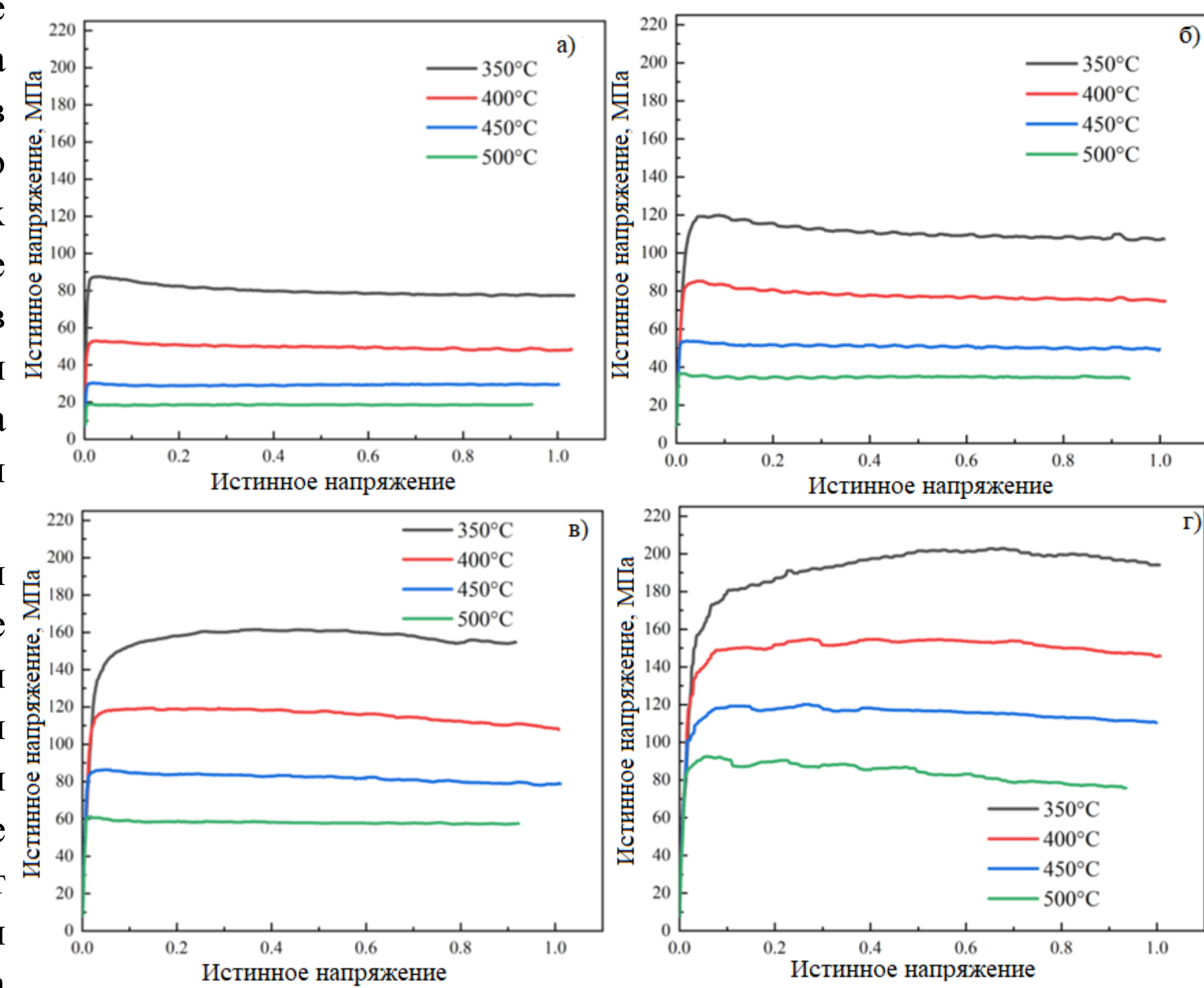


Рисунок 2 - Кривые напряжения сжатия-деформации сплава Al3Zn3Mg3CuEr при различных скоростях деформации: 0,01 c⁻¹ (а), 0,1 c⁻¹ (б), 1 c⁻¹ (в), 10 c⁻¹ (г)

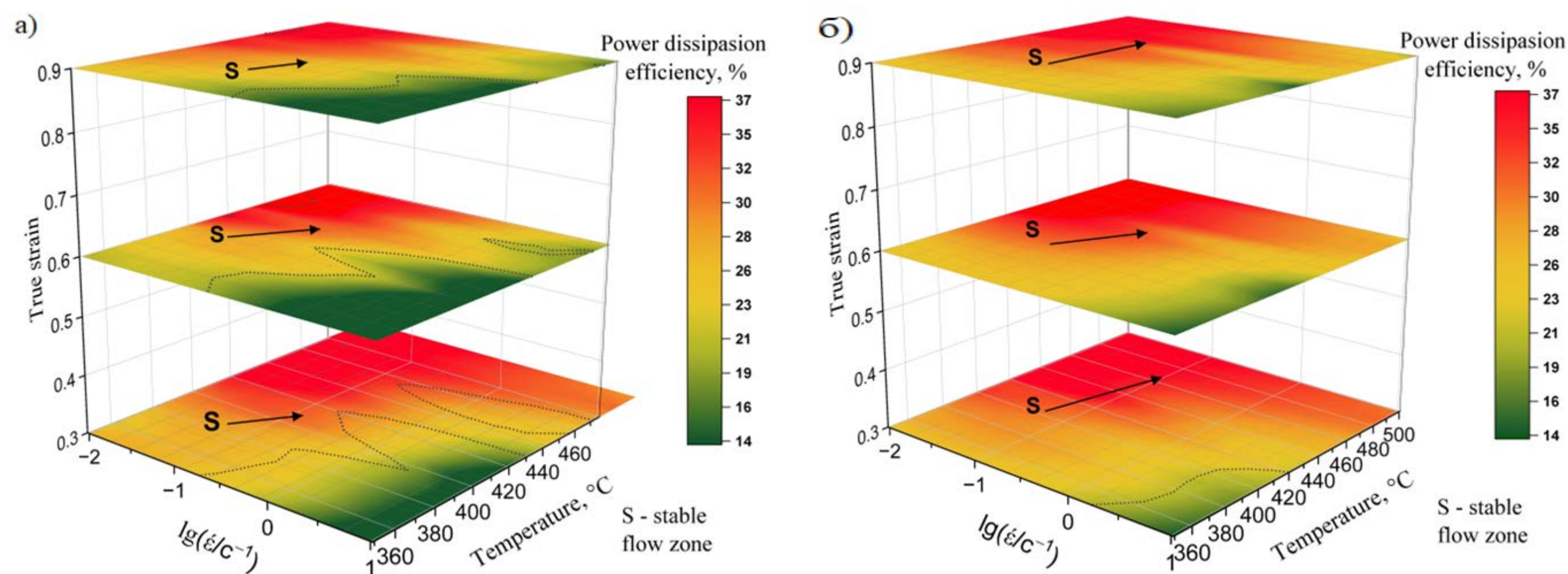


Рисунок 3 -3D- карты деформации поведения сплавов Al3Zn3Mg3Cu (а) и Al3Zn3Mg3CuEr при горячей деформации (б).

Оценка зеренной структуры при сжатии при различных температурах и скоростях деформации сплавов Al3Zn3Mg3Cu и Al3Zn3Mg3CuEr показывает, что в целом деформированные нерекристаллизованные структуры видны во всех условиях. Микроструктура доказывает, что основным механизмом размягчения является динамическое восстановление.

На рисунке 4 показано сравнение зеренной структуры сплавов Al3Zn3Mg3Cu и Al3Zn3Mg3CuEr после деформации при 450 °C и 0,01 c⁻¹. Границы субзерен отчетливо видны в одном деформированном зерне обоих сплавов. Несколько более мелкое зерно и субструктура образовались в сплаве с высоким содержанием Er за счет более мелких выделений с более высокой объемной долей. Выделения L12-(Al3(Zr,Er)) эффективно подавляют рекристаллизацию.

Подводя итог, можно выделить три положительных момента влияния легирования Er на деформационное поведение сплава Al3Zn3Mg3Cu:- повышение температуры солидуса, обеспечивающее повышение температуры горячей деформации;- увеличение объемной доли частиц затвердевающего происхождения, что обеспечивает снижение эффективной энергии активации;- увеличение объемной доли более мелких выделений L12, подавляющих рекристаллизацию и обеспечивающих устойчивую горячую деформацию.