

## УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕДИ М1 В УСЛОВИЯХ НОРМАЛЬНЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Ф. Ф. Царук, А. В. Новицкий, Р. Ю. Муравьев

*Белорусский государственный технологический университет  
220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13-а  
a\_v\_novitskiy@mail.ru*

Рассмотрены вопросы циклической прочности меди М1 при циклическом деформировании знакопеременным симметричным изгибом в условиях повышенных температур. Установлен характер изменения пределов усталости, микротвердости и циклического предела текучести. Сделан вывод о подобии протекания процесса усталости на низких и высоких частотах нагружения.

Исследование циклической прочности медного сплава М1 при знакопеременном симметричном циклическом изгибе проводилось в диапазоне температур 293 К – 673 К. Нагружение образцов осуществлялось с помощью магнитострикционного резонансного стенда ( $f_{рез} = 8,8$  кГц) и электродинамического вибростенда ( $f_{рез} = 0,22$  кГц). Испытательный стенд работал в автоколебательном режиме с автоматическим поддержанием амплитуды колебаний образцов, которые представляли собой бабочки прямоугольного сечения (1,8х6 мм), вырезанные вдоль направления проката, подвергнутые вакуумному отжигу, шлифовке и электрополировке. На низкой частоте нагружения образцы колебались по первой собственной форме колебаний, на высокой частоте – по второй. Нагрев образцов в электропечи сопротивления (макс. отклонение  $\pm 2$  К) производился с выдержкой образца при заданной температуре до нагружения в течение часа. Испытания продолжались до появления в образце усталостной трещины заданного размера, что отмечалось по падению резонансной частоты установки [1].

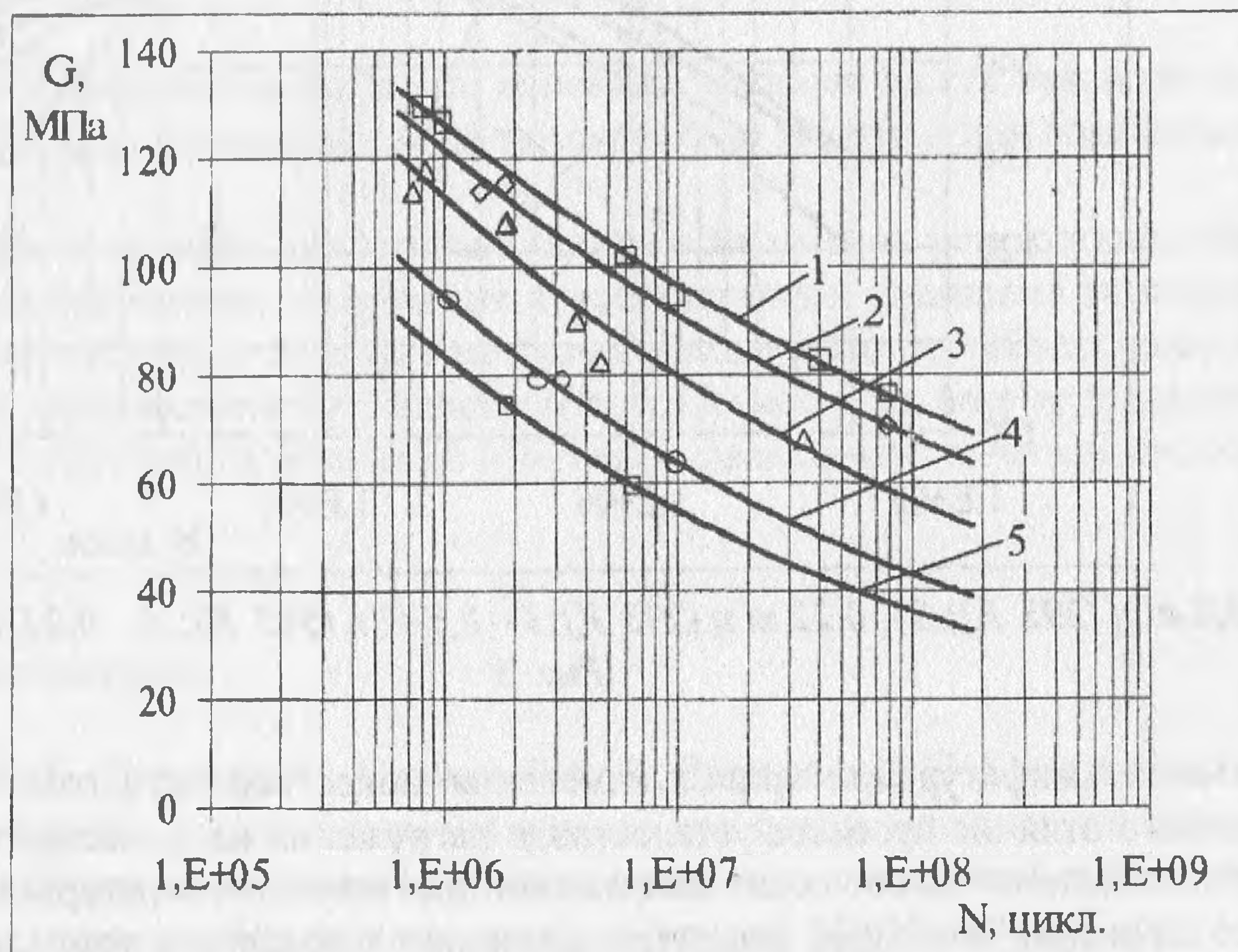
Статистическая обработка результатов усталостных испытаний, осуществленная на основании гипотезы нормального закона распределения, позволила установить, что температура практически не влияет на характеристики рассеяния усталостной долговечности исследованного материала, лишь несколько увеличивая вероятность разрушения образца с ростом температуры. Увеличение температуры практически не сказывается на форме усталостных кривых, но приводит к монотонному снижению усталостной долговечности для всех баз испытаний (рис. 1). Можно отметить увеличение интенсивности снижения долговечности с ростом числа циклов нагружения. Повышение температуры испытаний более ощутимо влияет на протекание процесса усталостного повреждения по сравнению с числом циклов, значительно интенсифицируя падение циклической прочности материала.

Увеличение частоты нагружения (от 0,22 до 8,8 кГц) при нормальной и повышенной температуре практически не сказывается на форме усталостных кривых. При этом сохраняется их эквидистантность и отмечается монотонный рост усталостной долговечности на всех базах испытаний (рис. 2).

Все вышеперечисленное позволило предположить отсутствие значимых различий в физике процесса усталостного повреждения на низких и высоких частотах нагружения

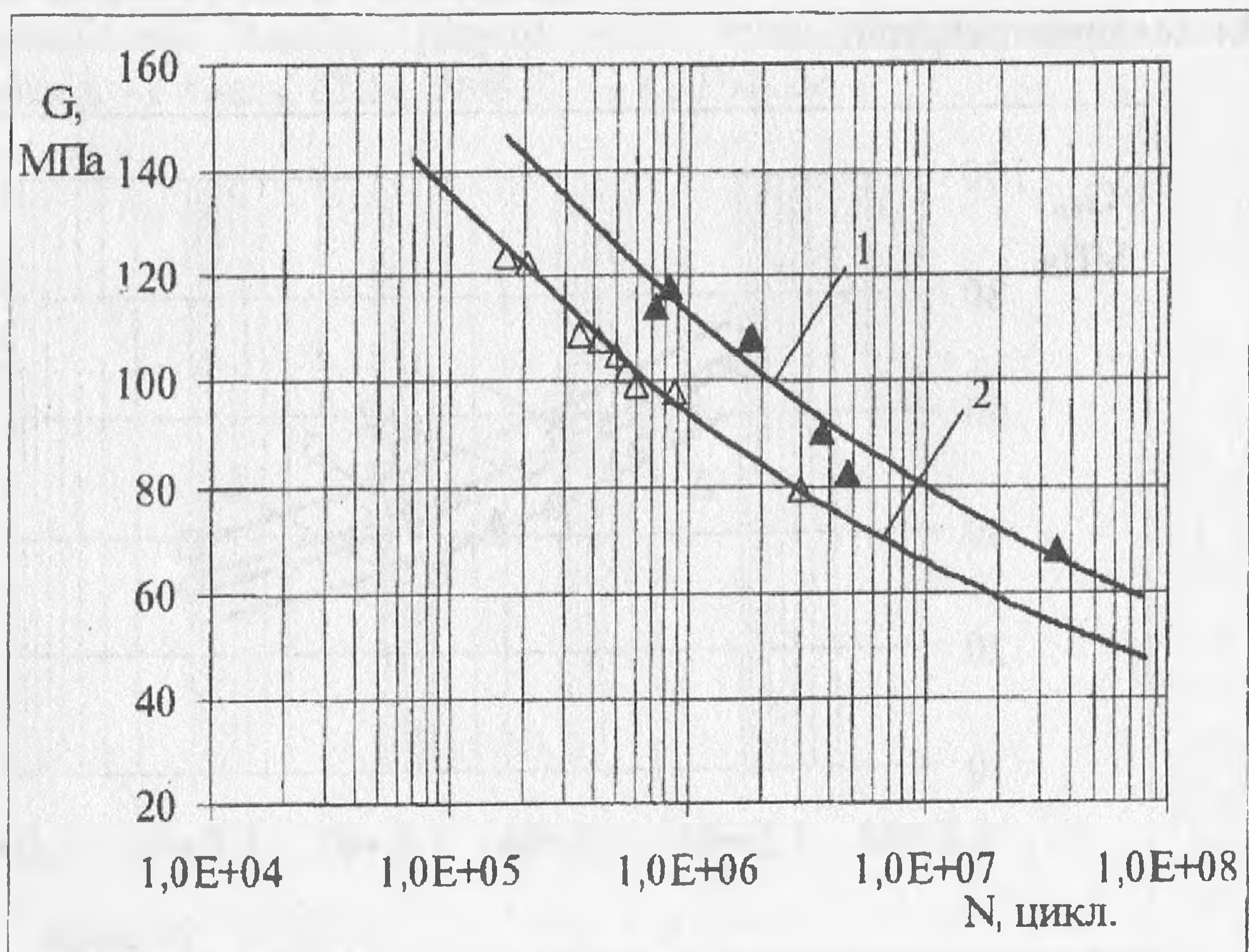
во всем температурном диапазоне, для подтверждения чего были проведены исследования кинетики физико-механических характеристик материалов в процессе нагружения на различных частотах. После вылеживания образцов в течение суток при комнатной температуре исследовались структурно-чувствительные характеристики: микротвердость  $H_{\mu}$  и циклический предел текучести  $\sigma_{цт}$ .

Исследование микротвердости производилось с помощью прибора ПМТ-3 по стандартной методике. Отношение величины циклических напряжений к величине ограниченных пределов выносливости для всех частот и температур принято одинаковым [2].



1 - 293 K; 2 - 428 K; 3 - 543 K; 4 - 613 K; 5 - 673 K;

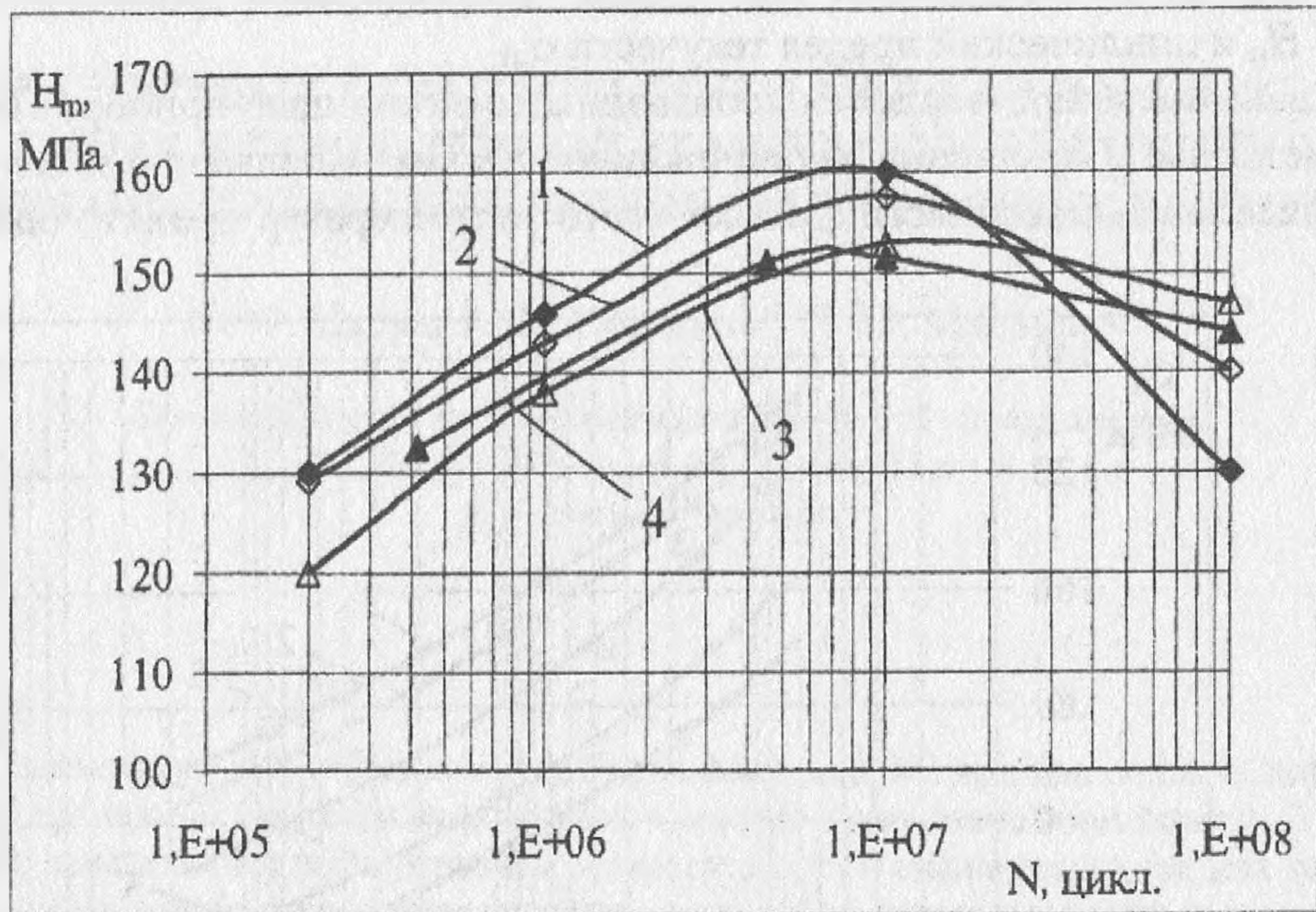
Рис. 1.



1 - 8,8 кГц (543 K); 2 - 0,2 кГц (543 K)

Рис. 2.

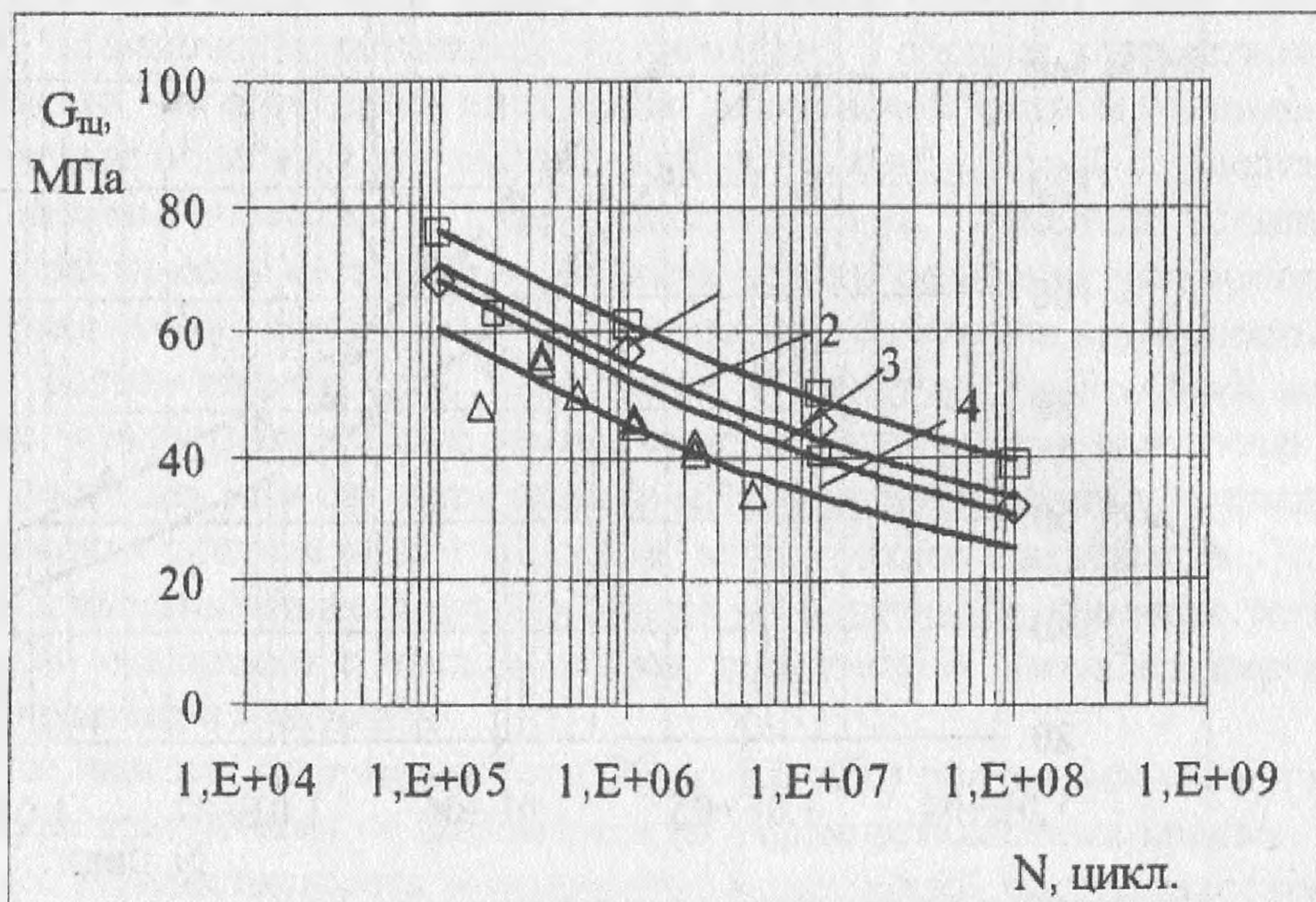
Результаты экспериментов показывают (рис.3), что рост числа циклов для всех температур и частот нагружения характеризуется увеличением  $H_m$  на начальной стадии до максимума с последующим ее уменьшением.



1 – 8,8 кГц (293 К); 2 – 0,22 кГц (293 К); 3 – 8,8 кГц (543 К); 4 – 0,22 кГц (543 К).

Рис. 3

Сохранение конфигурации кривых изменения микротвердости говорит об отсутствии коренного отличия процесса усталостного нагружения на существенно различных скоростях приложения циклических напряжений для всего температурного диапазона. Некоторое снижение величины микротвердости при повышении температуры свидетельствует о конкуренции двух процессов: упрочнения за счет повышения плотности дислокаций и разупрочнения за счет отжига. Повышение температуры одновременно активизирует и генерацию и аннигиляцию дислокаций и вакансий, не позволяя подвижным дислокациям закрепиться.



1 – 8,8 кГц (273 К); 2 – 8,8 кГц (543 К); 3 – 0,22 кГц (273 К); 4 – 0,22 кГц (543 К);

Рис. 4.

Накопление повреждений в слабых и наиболее благоприятно ориентированных по отношению к приложенному напряжению микрообъемах материала приводило к возникновению на полированной поверхности образцов полос скольжения, являющихся результатом выхода на поверхность дислокационных скоплений в виде плотно расположенных экструзий и интрузий. Кинетика величины напряжения, соответствующего моменту появления полос скольжения (циклическому пределу текучести  $\sigma_{цт}$ ) показывает монотонное снижение данной характеристики с ростом числа циклов разрушения для всех исследуемых температур и частот колебаний аналогично кривым усталости (рис. 4).

Данные исследований показали, что основные закономерности накопления усталостных повреждений в условиях высоких температур те же, что и при комнатных температурах.

Таким образом, показан одинаковый характер изменения усталостных характеристик при различных частотах нагружения в исследованном диапазоне температур, что может служить основой для создания методики ускоренного прогнозирования высоко-температурной низкочастотной усталостной долговечности на базе использования высокой частоты нагружения и данных об изменении физико-механических свойств.

### Список литературы

1. Довгялло И. Г., Царук Ф. Ф., Новицкий А. В., Рудченко Д. Н. Комплекс для усталостных испытаний металлических материалов при повышенных температурах // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: Материалы междунар. Науч.- техн. конф. - Могилев: ММИ, 1999 – С. 326.
2. Довгялло И. Г., Царук Ф. Ф., Юргилевич А. Н. Методика прогнозирования низкочастотной усталости конструкционных материалов по результатам высокочастотных изгибных испытаний. Современные проблемы машиноведения.: Матер. Междунар. научно-техн. конфер. (научн. чтен. посв. П. О. Сухому). // Под ред. А. С. Шагиняна. - Гомель: ГПИ, 1998.-Т. I.- С. 164-166.